

PROYECTO FIN DE GRADO



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Análisis numérico de la influencia de la geometría  
de un proyectil FSP impactando en una placa de  
kevlar 29.**

Autor: Yago Uzquiano Díez

Tutor: Marcos Rodríguez Millán

Curso 2014-2015



Título: Análisis numérico de la influencia de la geometría de un proyectil FSP impactando en una placa de kevlar 29.

Autor: Yago Uzquiano Díez

Tutor: Marcos Rodríguez Millán

EL TRIBUNAL:

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del proyecto fin de grado el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_ en Leganés en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la calificación de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, a mi hermano y a Laura por todo el apoyo recibido durante los cuatro años de grado. También a todos mis amigos y compañeros de la universidad, con los que he sufrido y en los que me he apoyado para sacar la carrera adelante.

He de agradecer a mi tutor de proyecto, Marcos Rodríguez Millán, por todos sus consejos durante la realización del proyecto expuesto.

## Resumen

El objetivo de este proyecto es analizar mediante el programa de elementos finitos ABAQUS el comportamiento frente a impacto de un proyectil FSP en una placa de Kevlar 29. Gracias a este programa se podrán obtener resultados de velocidades residuales y deformaciones a lo largo de la placa y en el propio proyectil.

Las fibras de kevlar son las más utilizadas en tema de defensa personal gracias a su excelente relación calidad-peso. Hay que destacar que en el caso de los chalecos antibalas para grandes calibres, no se utiliza solo fibra de kevlar, pues por sí misma no realiza las funciones necesarias para defender al usuario de un proyectil enemigo. Si se desea construir un chaleco para balas de gran calibre disparadas a más de  $1000 \frac{m}{s}$ , a la fibra de kevlar se le suelen añadir dos capas más. Una primera de un cerámico y una segunda de un acero ligero. El presente trabajo se centrará exclusivamente en el estudio del kevlar, pues es el objetivo necesario para la línea de investigación que se está llevando a cabo en el departamento de mecánica.

Para realizar el análisis mediante el programa de elementos finitos, se ha creado una simulación numérica de un proyectil impactando en un tejido de Kevlar. Antes de realizar el análisis de la influencia de la geometría del impactador, se ha validado el modelo numérico con datos recogidos en la literatura. Posteriormente, se ha realizado un análisis balístico de la geometría del proyectil para un amplio rango de velocidades de impacto. Concretamente se ha analizado tanto la resistencia como el comportamiento frente a impacto de la fibra de Kevlar frente a proyectiles del tipo FSP (fragment simulating proyectil). Debido a que no se puede añadir directamente las propiedades del material en el programa, se necesitará de varias líneas de código en lenguaje FORTRAN, que modelen el comportamiento en tres dimensiones de la fibra. Estas se juntarán al modelo realizado en el programa de elementos finitos mediante una subrutina VUMAT.

Inicialmente se necesitó de un estudio previo de la literatura del tema para encontrar ejemplos experimentales con los cuales poder comprobar la veracidad del programa creado en abaqus. Asimismo se tuvo que acudir a la literatura científica para poder obtener las propiedades que hacen del Kevlar una fibra tan especial en el campo de defensa personal frente a armas de fuego.

## Abstract

This main purpose of this document is to analyze the behavior of Kevlar fibers if they are subjected to an impact from a fragmented simulating projectile (FSP). In order to analyze this impact, I will use a commercial numerical model software ABAQUS CAE. Thanks to this program, I will be able to obtain residual velocities and deformations in the Kevlar layer and also in the projectile.

Kevlar fibers are the most common in bullet proof vests thanks to its excellent relation quality-weight. Before I begin this document, I should point out that in the case of bullet proof vests for big calibers, Kevlar fibers have other materials added to make the vest more effective. On its own, it would not defend the user against an enemy projectile. If we wish to build a bullet proof vest against big calibers shot at more than  $1000\frac{m}{s}$ , we must add two more layers to the Kevlar fibers. The first one is a ceramic one that will disperse the impact so that the Kevlar can work and the second one is a light steel that reduces to a minimum the impact to the user. In the present document, I will not bear in mind those two layers and I will focus on the effects of the impact in Kevlar. As it is what is needed in the investigation line being carried by the mechanics department.

To develop the numerical model analysis in the program, there must be created a simulation of a projectile impacting on Kevlar fibers. Before changing any parameters, a search must be done to find an experiment in which I can extract data to compare with the experiment and verify that the data obtained in the computer are similar to the ones in reality. Afterwards, I will proceed to vary parameters of velocity and geometry. I will analyze the obtained data and proceed to reach conclusions. So the main purpose of this document is to analyze both, the resistance and the behavior of a kevlar fiber plate against an impact of a fragmented simulating projectile.

In order to use the computer program, I will need to add the properties of Kevlar fibers. I will not be able to add them directly in the program, so I should use some code lines written in fortran language to describe how this material behaves in a three dimensional space. This code lines will be added to the main program developed by a finite element software with a VUMAT subroutine.

Initially, I need to do some research to find an experiment in which I could check up on the veracity of the simulation developed by the ABAQUS program. Moreover, I had to look for the properties that make the Kevlar that special fiber in the field of personal defense against gun fire.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos .....	4
Resumen.....	5
Abstract .....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Motivación .....	10
1.2 Objetivos .....	11
1.3 Metodología.....	12
1.4 Aportaciones originales.....	12
2. ESTADO DEL ARTE .....	14
2.1 Introducción .....	14
2.2 Kevlar: poliparafenileno tereftalamida .....	15
2.3 Impacto Balístico .....	17
2.4 Método de los elementos finitos. ....	23
2.5 Abaqus versión 6.12 .....	25
2.5.1 Funcionamiento del software .....	25
2.5.2 Conceptos teóricos del daño por impacto sobre placas compuestas en Abaqus28	
3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES.....	32
3.1 Introducción .....	32
3.2 Características y modelación del ensayo .....	33
3.3 Geometrías utilizadas.....	40
3.3.1 FSP empleados .....	40
3.3.2 Geometría de placa utilizada.....	43
3.4 Validación del modelo numérico .....	44
3.5 Influencia de los parámetros de la subrutina en el límite balístico .....	46
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
4.1 Comparación velocidad de entrada velocidad de salida según la geometría.....	48
4.2 Influencia de la geometría en el límite balístico. ....	54
4.3 Análisis de las máximas deformaciones de la placa en el límite balístico.....	57
5. CONCLUSIONES .....	61
5.2 Posibles mejoras del trabajo. ....	63
REFERENCIAS.....	64

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Impacto de proyectil en tejido de Kevlar .....	16
Ilustración 2: Péndulo balístico .....	18
Ilustración 3: Medidas de un proyectil FSP de calibre .22 .....	19
Ilustración 4: Modos de fallo en impacto .....	20
Ilustración 5: Geometría del proyectil en Abaqus.....	33
Ilustración 6: Geometría de la placa de Kevlar .....	34
Ilustración 7: Resultado final tras el Assembly .....	35
Ilustración 8: Propiedades de interacción del modelo .....	36
Ilustración 9: Cargas aplicadas y empotramiento del modelo.....	37
Ilustración 10: Representación del mallado.....	39
Ilustración 11: Código escrito en el compilador de fortran .....	39
Ilustración 12: FSP geometría 21° .....	40
Ilustración 13: FSP geometría 35° .....	40
Ilustración 14: FSP geometría 45° .....	41
Ilustración 15: FSP geometría 50: .....	41
Ilustración 16: FSP geometría 90° .....	42
Ilustración 17: FSP geometría 135.....	42
Ilustración 18: Geometría de la placa .....	43
Ilustración 19: Curva balística para geometría de 35° .....	49
Ilustración 20: Curva balística para geometría de 21° .....	50
Ilustración 21: Curva balística para geometría de 45° .....	51
Ilustración 22: Curva balística para geometría de 50° .....	52
Ilustración 23: Curva balística para geometría de 90° .....	54
Ilustración 24: Gráfico de límite balístico/ ángulo de pico.....	55
Ilustración 25: Gráfico de límite balístico/ ángulo de pico incluyendo 135° .....	56
Ilustración 26: Deformaciones máximas en función de la geometría. (a) geometría de 21, (b) geometría de 35, (c) geometría de 4, (d) geometría de 50, (e) geometría de 90, (f) geometría de 135.....	58
Ilustración 27: Gráficas de deformaciones en función del ángulo del proyectil.....	59
Ilustración 28: Gráficas de deformaciones en función del límite balístico .....	59



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de propiedades del Kevlar con cable de acero .....	17
Tabla 2: Unidades a introducir en el software Abaqus .....	28
Tabla 3: Límites balísticos en función del espesor en experimento de Horace Billon. ....	44
Tabla 4: Datos de calibración del modelo .....	45
Tabla 5: Influencia de los parámetros que conforman el material .....	46
Tabla 6: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 35° .....	48
Tabla 7: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 21° .....	49
Tabla 8: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 45° .....	51
Tabla 9: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 50° .....	52
Tabla 10: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 90° .....	53
Tabla 11: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 135° .....	54
Tabla 12: Límite balístico en función de la geometría .....	55
Tabla 13: Máximas deformaciones en función de geometría y límite balístico .....	58

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

El ser humano desde la prehistoria ha utilizado su intelecto para crear armas. Estas armas en un inicio estaban diseñadas para la caza de animales. Sin embargo, con el paso de los siglos, el hombre en lugar de emplear estas armas exclusivamente para la caza de animales, comenzó a utilizarlas para dañar a otros seres humanos. Es aquí cuando nace el concepto de defensa personal. Tuvieron que pasar varios milenios hasta desarrollar esta defensa tal y como la entendemos hoy en día. El primer escudo del que se tienen datos estaba fabricado en cuero. Este material se fue modificando hasta llegar a los metales. El primer metal utilizado fue el cobre y posteriormente se empezaron a desarrollar escudos de bronce.

Paralelamente al desarrollo del escudo, nuestros antepasados comenzaron a desarrollar las primeras armaduras. La primera armadura de la que se tiene constancia es de la época egipcia. Esta consistía en una coraza metálica. Posteriormente los griegos y los romanos mejoraron el arte de hacer armaduras. Como se puede ver, a lo largo de la historia han ido evolucionando a la par tanto las armas como las prendas diseñadas para proteger al ser humano.

Durante el siglo XI se produjo un cambio que acabaría modificando la historia de las guerras. En China se comenzaron a utilizar mezclas explosivas de escasa potencia que acabarían desarrollándose en las potentes armas de fuego que se tienen en la actualidad. En Europa, sin embargo, no se tiene ningún dato de armas explosivas hasta el siglo XIV. Durante 700 años las armas de fuego se han ido modificando y a día de hoy se pueden disparar proyectiles a más de  $2000 \frac{m}{s}$ .

Por otro lado, los chalecos antibalas comenzaron sus andaduras por la historia en el año 1538. Filippo Negroli fabricó la primera armadura a prueba de balas que posteriormente sería probada por Maximiliano II de Habsburgo. No fue hasta mediados del siglo XIX que se creó un chaleco antibalas liviano. A mediados del siglo XX, se comenzaron a producir nuevos chalecos fabricados con fibras de plástico reforzados con fibras de aluminio. Esta mezcla los aligeraba en gran medida. Es en 1965 cuando la marca DuPont sintetiza por primera vez una fibra de kevlar. La firma no comenzó a comercializarlo hasta 1972 ya que tuvieron serios problemas en su producción. Este material es muy utilizado hoy en día debido a que es capaz de soportar altas tensiones siendo un material de baja densidad. Estas fibras aguantan esfuerzos cinco veces los soportados por el acero, lo que las hace muy útiles en temas balísticos.

Desde hace varios años he sentido atracción por las armas de fuego. Mi pasión por este tema me llevó a investigar por mi cuenta el tema de protección personal, desde escudos policiales hasta los más sofisticados chalecos antibalas. Cuando vi que Marcos Rodríguez ofrecía un proyecto de un análisis balístico no lo dudé ni un momento.

Debido a que los proyectiles tienen geometrías, pesos y velocidades variables, se puede realizar la pregunta de si las mismas fibras de kevlar son capaces de soportar los mismos esfuerzos y energías de un impacto a diferentes velocidades y con distintas geometrías. Es aquí donde entran en juego las amplias posibilidades de este documento. Conseguir desarrollar un análisis dinámico mediante un programa de elementos finitos capaz de representar la realidad de un impacto sobre una fibra de kevlar y proporcionar unos resultados lo más fiables posible. Si se consigue desarrollar esta aplicación, se logrará tener a disposición del usuario una herramienta muy útil que podría servir para evitar realizar una gran cantidad de experimentos. Esto supondría una reducción de costes experimentales de la empresa que poseyera la aplicación.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto de fin de grado es la creación y validación de un modelo numérico que reproduzca el comportamiento frente a impacto del kevlar sometido a cargas de impacto mediante un proyectil tipo FSP. Para ello se ha utilizado el programa de elementos finitos ABAQUS. Este proyecto se hace como complemento de una línea de investigación del departamento ingeniería mecánica.

Uno de los materiales más utilizados en la defensa personal durante los últimos años ha sido la fibra de kevlar. Este se ha introducido en todo tipo de prendas, desde chalecos hasta cascos. Todos ellos diseñados para la defensa personal.

Para el desarrollo del Trabajo Fin de Grado se han fijado los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un modelo válido en el cual se desarrolle el impacto de un proyectil sobre una placa. Inicialmente se creó un modelo de impacto con Plomo impactando sobre acero. No se introdujo la subrutina hasta que el modelo de impacto metal frente a metal funcionase perfectamente.
- Puesta a punto de una subrutina de usuario: Una vez este modelo estaba completo, se procedió a añadir la línea de código que define las propiedades del kevlar 29. Debido a la complejidad de la modelización de las fibras de Kevlar, el código que define sus propiedades se debe introducir mediante una subrutina VUMAT en lenguaje fortran. Antes de comenzar a averiguar cómo afectan las velocidades y las distintas geometrías de la bala a nuestra placa de Kevlar, hay que asegurarse de que el modelo creado se corresponde con la realidad. En la Universidad Carlos III de Madrid no está permitido el uso de pólvora. Por lo que la comprobación del modelo habrá que hacerla mediante un experimento ya realizado. Para ello se ha tomado como referencia un experimento realizado por Horace Billon para el departamento de defensa australiano de la Commonwealth. En dicho experimento el autor realiza el impacto de un proyectil tipo FSP de calibre 22 con una masa de 1,1 gramos. El proyectil impacta en una

placa cuadrada de kevlar de 20,3 cm de ancho por 1,02 cm de espesor. En este experimento se puede observar como el límite balístico del proyectil es de  $300 \frac{m}{s}$ . Tomando estos datos como punto de partida, se tuvieron que realizar una serie de ajustes en los parámetros que definen el kevlar en el código fortran. Se modificaron las deformaciones (Strains) para que el límite balístico del modelo fuese el mismo que el experimental.

- Análisis de la morfología del proyectil FSP en el análisis balístico del kevlar: Una vez se han retocado estos parámetros y se ha conseguido que nuestro modelo se ajuste a la realidad, se puede proceder a la modificación de los parámetros de la geometría del proyectil, para poder sacar conclusiones de cómo afecta la geometría del proyectil al límite balístico y a las velocidades residuales.

### 1.3 Metodología.

Para completar los objetivos anteriormente mencionados, ha sido necesaria la realización de las siguientes tareas:

- Búsqueda en bases de datos de literatura que contenga datos acerca de las propiedades del Kevlar, normativa sobre proyectiles FSP y ensayos experimentales sobre los cuales basar el análisis de resultados del programa creado.
- Creación de un modelo en el programa ABAQUS que reproduzca el impacto de un proyectil con geometría FSP sobre una placa de Kevlar 29.
- Aplicación de la subrutina VUMAT que defina las propiedades del material compuesto.
- Validación del modelo. Consiste en la variación de los parámetros de las líneas de código de la subrutina para que los resultados obtenidos mediante la simulación sean exactamente iguales a los obtenidos mediante un experimento llevado a cabo en la realidad.
- Modificación de la geometría del proyectil y análisis de resultados basándolos en el cálculo del límite balístico, velocidades residuales y deformaciones máximas de la placa estudiada.

### 1.4 Aportaciones originales.

- Creación de un modelo mediante el programa de elementos finitos ABAQUS que represente un impacto de un proyectil FSP sobre una placa de Kevlar 29. Esta aplicación puede ser de gran utilidad a la hora de realizar ensayos balísticos. Gracias a ella, las empresas podrían descartar varios espesores de materiales antes de determinar el límite balístico de una placa, ahorrando en materiales y

en personal. La defensa personal es un tema muy delicado por lo que a pesar de conseguir una primera aproximación, se debería comprobar posteriormente mediante un análisis experimental.

- Análisis de la influencia de la geometría de un proyectil de tipo FSP en el cálculo del límite balístico de una placa de Kevlar 29.
- Validación de una subrutina VUMAT de un modelo de impacto de proyectiles FSP sobre una placa. La validación será utilizada por una línea de investigación del departamento de mecánica.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción

Como ya se ha mencionado en la introducción, la fibra de kevlar es un material compuesto de gran complejidad. Se define material compuesto como la suma de dos o más materiales con características físicas o químicas diferentes. La suma de ambas proporciona un tercer material con características diferentes a los materiales de los que parte.

Históricamente los primeros materiales compuestos, se dice que fueron los ladrillos creados a partir de paja y barro. Igual que las armaduras y los escudos mencionados en el apartado 1.1 de este documento, los materiales compuestos han ido evolucionando a lo largo de los siglos. Durante el siglo XX se comenzaron a fabricar todo tipo de materiales compuestos derivados de los polímeros. La gran ventaja que poseen estos materiales con respecto a los convencionales es su alta resistencia con una baja densidad. Dentro de estos materiales encontramos las fibras de carbono o de vidrio, así como las fibras de Kevlar desarrolladas por DuPont. Estas últimas son unas fibras de aramida, dentro de las cuales se pueden encontrar varios tipos. En este trabajo se comentarán las propiedades del Kevlar 29 pues es el típicamente utilizado en los chalecos antibalas. Se debe mencionar que no es el único material utilizado en la fabricación de estos dispositivos de protección. Existen otras fibras como el grafeno que tienen propiedades aún superiores a las del kevlar. Sin embargo el precio de estas es muy superior y por eso se suelen desestimar a la hora de la creación de nuevos productos.

Las fibras de kevlar consisten en largas cadenas de moléculas que soportan altas temperaturas y no les afecta la corrosión. Este material está sintetizado a partir de tiras entrelazadas que forman una superestructura. Debido a su estructura se sabe a ciencia cierta la causa de la rotura de estos materiales cuando están sometidos a estados tensionales. Así como los metales plastifican cuando se supera una tensión máxima de rotura, las fibras rompen debido a una separación entre la matriz y la fibra. La matriz es la encargada de soportar las deformaciones del material y la fibra se encarga de soportar las altas tensiones. Es por ello que si a uno de los dos componentes que forman el material se lo somete a un exceso de carga o de deformación según corresponda, el material sufrirá un fallo.

En el presente trabajo se calculará el límite balístico de diferentes geometrías de proyectiles FSP. El límite balístico se puede medir con dos parámetros:  $V_0$  y  $V_{50}$ . El primero es la velocidad máxima a la cual ningún proyectil rompe el material. El segundo mide la velocidad máxima en la que el 50% de los proyectiles son detenidos por la placa de kevlar. En este documento se analizará el primero de los parámetros. El segundo no resulta de gran interés puesto que suponer que el 50% de los proyectiles lanzados atraviesan la placa no es una medida óptima de seguridad.

## 2.2 Kevlar: poliparafenileno tereftalamida

Kevlar es una marca registrada por la compañía estadounidense DuPont. Es una fibra orgánica que se encuentra dentro de la familia de las poliamidas. Esta fibra fue creada gracias a una dedicación constante junto a la fortuna del científico. Esta última, igual que en el descubrimiento de la penicilina, tuvo una importancia relevante. En los años 60, la compañía DuPont estaba buscando un componente más resistente que el nailon pero que igualmente fuese transparente. Todos los experimentos que resultaban en fibras opacas eran descartados. La fibra buscada tenía como intención servir como refuerzo de los neumáticos.

No fue hasta 1972 cuando Stephanie Kwoleck decidió mezclar varios cristales líquidos dando como resultado final una fibra opaca, más resistente que el nailon y que hoy en día se utiliza en más de 200 aplicaciones. La científica polaco-estadounidense había creado la fibra hoy conocida como kevlar. No obstante fue necesario el apoyo de Herbert Blades. Sin él, no se hubiese resuelto el problema de que disolvente emplear y por consiguiente no se hubiese obtenido la fibra de kevlar.

La compañía Azko comenzó a utilizar otro disolvente menos dañino para el producto. De esta manera la empresa holandesa fabricó sus fibras propias de kevlar y las comercializó en Europa. Esto daría lugar posteriormente a una guerra de patentes. Hoy en día se conoce que la fibra de Kevlar fue creada originalmente por la compañía DuPont, la cual lo fabrica en la actualidad.

El kevlar tiene una combinación única de alta resistencia, alto módulo de elasticidad con dureza y estabilidad térmica. Esto hace que este tipo de fibras sean muy deseables para un ingeniero. Se desarrolló para aplicaciones de demanda industrial avanzada. Desde sus inicios se ha utilizado para útiles de defensa personal frente a municiones de bajo calibre. Las fibras de Kevlar más utilizadas son el Kevlar 29 y el Kevlar 129. Sin embargo existen muchas más variedades de esta poliamida que abarcan una gran cantidad de combinaciones de propiedades.

Las fibras de kevlar se agrupan en hilos. Estos hilos se entrelazan en ángulos rectos formando tejidos. El tejido final es lo que se conoce como capa de tejido de kevlar. En los casos como el de este proyecto en los cuales los tejidos de kevlar se utilizan con fines de protección personal, se suelen utilizar capas planas.

Los filamentos que darán lugar a los tejidos de Kevlar se producen mediante la extrusión de un percusor a través de un spinnert. Gracias a la extrusión se aumenta la anisotropía de los filamentos. Cabe destacar una mejora de las fibras de kevlar: la mezcla con las fibras de carbono. Con esta mezcla se obtiene una tercera fibra que combina una alta resistencia a tracción con una alta resistencia al impacto y a la abrasión. Gracias a estas propiedades tiene usos militares así como protección frente a altas temperaturas.

Las fibras de kevlar no son más que cadenas sucesivas de polímeros. Si bien es cierto que una sola cadena de polímeros con la fórmula química adecuada ya se

considera una fibra de Kevlar, no es hasta que se unen mediante puentes de hidrógeno que forman grupos de aramidas y por consiguiente filamentos de Kevlar.

El tejido de kevlar es comunmente utilizado en la fabricación de protección armamentística. Esto es debido a que la bala al impactar en la placa (en caso de no superar el límite balístico) retrocede entorno a su eje manteniendo la trayectoria que llevaba inicialmente. Al ir rotando la bala, las fibras se entrelazan y facilitan la detención del proyectil.



*Ilustración 1: Impacto de proyectil en tejido de Kevlar*

En caso de querer frenar proyectiles de gran calibre que posean el núcleo de un material duro, el kevlar deja de ser una fibra idónea para proteger al usuario. Lo más probable es que la capa exterior del proyectil quede retenida en el tejido de Kevlar mientras que las capas inferiores atravesarán el tejido e impactarán al usuario. Por tanto los tejidos de Kevlar sólo son efectivos para impactos de proyectiles de bajo calibre.

Desde 1972 cuando se comienza a producir el Kevlar en serie, esta fibra se utilizó en forma de blindajes flexibles. Sin embargo a pesar de soportar altas tensiones, el kevlar sufría grandes deformaciones. Estas causaban daño al usuario, por lo que se comenzó a utilizar tejido de fibra de aramida como refuerzo al Kevlar. De esta manera la marca americana consiguió un blindaje rígido y así conseguir reducir el trauma que se le ocasionaba al usuario.

Existen dos situaciones en las cuales un individuo puede necesitar echar mano de protecciones personales. La primera y más común es en situaciones de origen civil. En estas se incluyen todo tipo de armas de bajo calibre es decir armas cortas. El caso más común es el de la policía. Todas las agencias de gobierno tratan de proteger a la policía y es por esto que en una gran cantidad de países las fuerzas de policía tienen que llevar por obligación un chaleco antibalas. El comportamiento del kevlar es diferente frente al impacto de un proyectil que frente a un ataque de arma blanca. Por este



motivo, si queremos que estas protecciones defiendan al individuo no solo de armamento balístico, sino también de armas blancas, se ha de modificar el chaleco.

En segundo lugar se encuentran las amenazas militares. Estas se suelen producir con armas de alto calibre disparadas a altas velocidades. Ahora los usuarios que necesiten protección frente a este tipo de armamento necesitan ligereza para poder moverse ágilmente en situaciones de peligro, sin olvidar la necesaria protección frente a grandes calibres. Por ello las empresas que se dedican a la comercialización de chalecos antibalas tienen un departamento específico de militarización. En él, a las fibras de kevlar se les añade una placa de un cerámico y otra de acero. Estas hacen que la protección sea un tanto más pesada que las protecciones civiles pero también consiguen proteger al usuario de grandes proyectiles disparados a altas velocidades.

Material	Densidad (lb/in <sup>3</sup> )	Módulo (10 <sup>6</sup> psi)	Elongación de Rotura %	Fuerza de tensión específica	CTE 10 <sup>-6</sup> /F	Temperatura de descomposición (°C)
Kevlar 29	0.052	10.2	3.6	8.15	-2.2	427-482
Kevlar 49	0.052	16.3	2.4	8.37	-2.7	427-482
Cable acero	0.280	29	2.0	1.0	+3.7	1500

Tabla 1: Comparación de propiedades del Kevlar con cable de acero

### 2.3 Impacto Balístico

Se considera impacto balístico cuando un proyectil de cualquier calibre impacta en una superficie. Antes de que se produzca este impacto, es necesario que un arma de fuego realice un disparo. Inicialmente la bala posee una velocidad, pero está sometida a una aceleración negativa debido a la resistencia con el aire. Una vez se produce el impacto, el proyectil lleva una velocidad igual o inferior a la velocidad con la que fue lanzado.

En el siglo XVIII se inventa el péndulo balístico. Fue una herramienta muy utilizada hasta la década de 1960 en la cual se crean los primeros estudios y teorías acerca del impacto balístico. Lo primero que se tiene que tener claro es que para que un tejido resista el impacto de un proyectil, ha de absorber toda la energía cinética del último. Como bien se ha estudiado a lo largo de la carrera, la energía cinética depende de la masa y de la velocidad del proyectil, por lo que el impacto balístico va a depender en gran medida de estos dos parámetros.

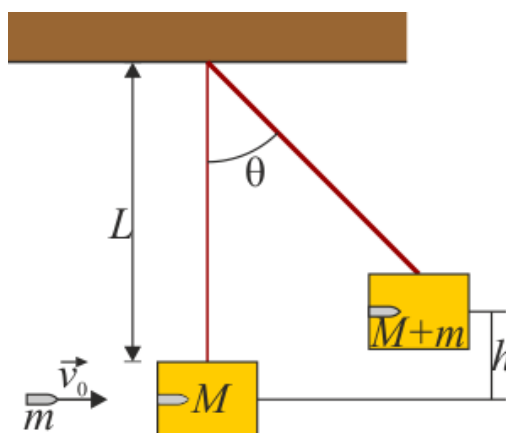


Ilustración 2: Péndulo balístico

El Péndulo balístico consiste en una masa suspendida de un cable. Las medidas de volumen, densidad y peso de la masa suspendida son conocidas (se muestra en la ilustración 2). La masa del objeto ha de ser estudiada previa al impacto para poder realizar los cálculos. Los materiales utilizados normalmente eran materiales que se pudiesen atravesar fácilmente sin que sufriesen una rotura drástica. Estos eran madera y arcilla. Toda la energía cinética del proyectil se va a convertir ahora en energía potencial gravitatoria. Esto hará que el proyectil quede introducido en la masa colgante y alcancen una cierta altura. Si se mide la altura que alcanza el bloque de madera o arcilla, se puede calcular muy fácilmente la energía potencial del conjunto y por lo tanto la cinética inicial de la bala.

Hay que mencionar que el choque entre el proyectil y el bloque es inelástico por lo que no hay una conservación de la energía. Parte de esta se disipará en forma de calor o en vibraciones. Si se tiene en cuenta la ley de la conservación de la energía (aunque ya se ha explicado que es una simplificación del cálculo real), podemos obtener la velocidad de impacto.

$$\frac{1}{2}(m + M)v_o^2 = (m + M)g(1 - \cos\theta)$$

$$v_o = \frac{m + M}{m} \sqrt{2g(L_{cable} - \sqrt{(L_{cable}^2 - x_{horizontal}^2)})}$$

El presente trabajo consiste en ver la influencia de la geometría de un proyectil al impactar en una placa de kevlar. Como se ha mencionado en este apartado, en el impacto balístico influyen en su mayoría la masa y sobre todo la velocidad del proyectil lanzado. Sin embargo la geometría de la bala también influye. Analizando proyectiles, se pueden observar de forma puntiaguda o con mayor o menor ángulo. En este documento se analizarán los resultados de un impacto de diferentes proyectiles con geometrías variadas.

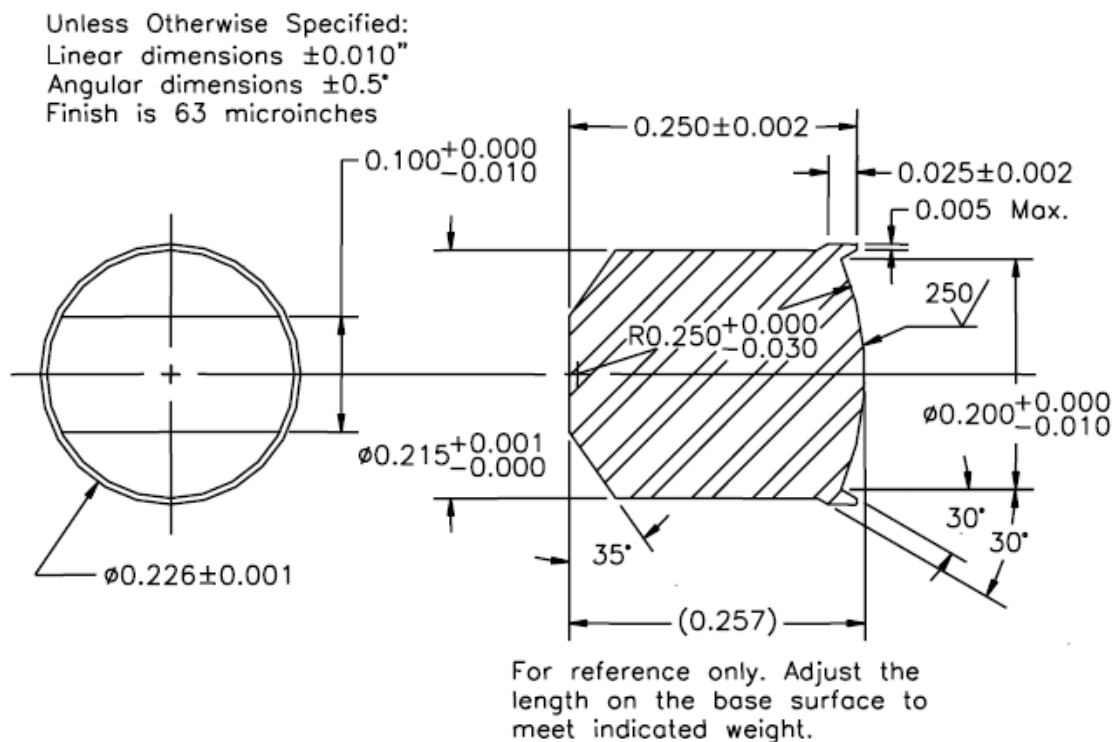


Ilustración 3: Medidas de un proyectil FSP de calibre .22

Para ello se analizará la influencia de la geometría en el límite balístico. Como se puede ver en la ilustración 3, el calibre homologado tiene un ángulo de punta de  $35^\circ$ . Lo que se hará en este documento, será variar este ángulo para ver cómo le afecta al límite balístico. Este no es más que la velocidad última que es capaz de soportar una placa sin ser atravesada por completo por un proyectil. Existen casos límite en los cuales la punta del proyectil atraviesa la placa pero finalmente retrocede o se detiene. A pesar de que exista una completa penetración, se dice que la placa ha aguantado. Por tanto no se considera rotura del material impactado.

Se ha estudiado en varios experimentos realizados, que la trayectoria de la bala se desvía cuando la velocidad es muy próxima al límite balístico. Cuando la velocidad de impacto es muy superior y existe una alta velocidad residual, la trayectoria del proyectil no se ve desviada. En los experimentos llevados a cabo mediante el programa de elementos finitos, se ha utilizado una condición de no desplazamiento vertical. Esto significa que la desviación mencionada no se va a poder observar en el experimento. Sin embargo esto no significa que no ocurra. La diferencia con la realidad es que en lugar de haber un cambio de trayectoria, el proyectil estará sometido a una serie de tensiones un tanto superiores a la realidad.

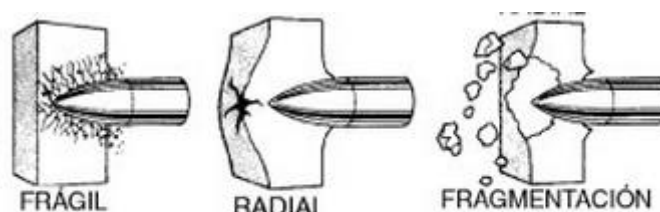
En el impacto de un proyectil, se generan una serie de ondas de compresión que se propagan tanto en la bala como en la placa que recibe el impacto. A altas velocidades de impacto, aparecerán altas tensiones a tracción a lo largo de la placa. También existe la posibilidad de que el proyectil no lleve la suficiente velocidad como para romper la

protección. En este caso la bala impactará en la placa y rebotará en esta. Esto significará que la protección ha cumplido su objetivo de evitar que el usuario sufra daños severos.

A parte de los parámetros ya mencionados como la geometría, la velocidad o la masa del proyectil hay más parámetros que afectan al límite balístico. Algunos de los más importantes son:

- Densidad del material. Cuanto mayor es la densidad de la placa impactada, más difícil será atravesar el material. El cambio de densidades hace que se cambie el tipo de fibra así como la estructura. Con respecto a esta última se relacionan los filamentos.
- Tipo de hilo: Las propiedades de los tejidos serán distintas a las de los hilos. Los laminados a base de tejidos presentan un mayor límite balístico.
- Placa de impacto: Las dimensiones de la placa influyen enormemente. El parámetro que más influye es el espesor. Cuanto mayor sea, mayor será el límite balístico.

El material puede fallar de diversas maneras. El mecanismo de rotura depende de todas las variables que influyen en el límite balístico además de la sujeción de la placa sobre la que se produzca el impacto. En la siguiente figura se muestran algunos de los modos de fallo más comunes.



*Ilustración 4: Modos de fallo en impacto*

Aunque lo normal es que se dé un fallo dominante, puede estar acompañado de otro tipo de fallos. Por lo tanto, el fallo final se obtiene de la suma de todos los fallos producidos en la placa.

Existen diferentes criterios de fallo que determinan el punto de rotura de la lámina. Se distinguen tres criterios diferentes. Cada uno de ellos considera distintos parámetros. Se pueden encontrar aquellos criterios en los que únicamente existe una comparación de los valores máximos, criterios en los que se consideren diferentes componentes que tienen lugar en el mismo instante de tiempo y, por último, los que solo consideran las diferentes componentes de tensión.

► Criterios de comparación con valores máximos:

- Deformación máxima: Este criterio asume que los valores máximos según los cuales el material va a romper son los valores de deformación máxima del material en el cual se está realizando el análisis.
- Tensión máxima: Es igual que el anterior. Simplemente varía la deformación por la tensión máxima, siendo la última la causante del fallo del material.

► Criterios que consideran diferentes componentes:

- Criterio de Tsai-Hill (1968): En materiales anisótropos, este criterio de plastificación tiene sus orígenes en el criterio de Von Mises. En él intervienen una serie de parámetros de plastificación y su expresión general viene dada por la siguiente fórmula:

$$(G + H)\sigma_X^2 + (F + H)\sigma_Y^2 + (F + G)\sigma_Z^2 - 2H\sigma_X\sigma_Y - 2G\sigma_X\sigma_Z - 2F\sigma_Y\sigma_Z + 2L\tau_{YZ}^2 + 2M\tau_{XZ}^2 + 2N\tau_{XY}^2 = 1$$

En el caso de materiales compuestos, admitiendo un material de tipo elástico lineal, el criterio sería considerado como un criterio de rotura. En caso de actuar únicamente una tracción en la dirección de las fibras, la rotura se produciría cuando la tensión fuese igual a la resistencia X. Este criterio se utiliza en el caso de una lámina unidireccional que trabaje en tensión plana. Asumiendo que X e Y son las mismas, se obtiene una expresión más simplificada de este criterio:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$$

- Criterio de Tsai-Wu (1971): Este criterio es posterior al anterior y un tanto más complejo. Esto es debido a que en los años intermedios entre ambos criterios se realizaron numerosos experimentos y hubo que adecuar los criterios a los resultados obtenidos experimentalmente. Este criterio sigue la siguiente expresión:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1.$$

Hay que ser capaces de calcular todos estos parámetros a priori desconocidos. Para ello se hace uso de un ensayo de tracción biaxial bastante complejo. Se dice que cuando el criterio alcanza la unidad, la lámina que se está ensayando sufre fallo.

► Criterios que consideran modos de fallo de diferentes componentes:

- Chang-Chang: En este criterio se proponen diferentes modos de rotura. El primero de ellos se corresponde a la rotura de fibras y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$$

A esta parte del criterio se le ha añadido la contribución de la cortadura en el plano. La segunda parte es parecida a la primera pero se refiere a la dirección transversal en tracción. Viene dada por la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$$

La última parte del criterio es la del fallo por compresión de la matriz y viene representada por la siguiente ecuación:

$$0.25 \left(\frac{-\sigma_{22}}{S_{12}}\right)^2 + 0.25 \frac{Y_c^2 \sigma_{22}}{S_{12}^2 Y_c} - \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{22}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$$

- Hashin: Este criterio diferencia esencialmente estados tensionales con estados a compresión. Cada uno de ellos con sus respectivas fórmulas. Según la matriz de compresión y de tracción y según las fibras a tracción y a compresión. Las ecuación que determinan el fallo de la lámina según este criterio son las siguientes:

- Rotura de fibras a compresión:  $e_{fc}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1$
- Rotura de fibras a tracción:  $e_{ft}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$
- Rotura de la matriz a tracción :  $e_{mt}^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$
- Rotura de matriz a compresión:  $e_{mc}^2 = \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1$

Se dice que el fallo se produce cuando la ecuación que lo representa alcanza el valor de la unidad.

## 2.4 Método de los elementos finitos.

El mundo en el que vivimos es un mundo complejo. Subdividido en miles de operaciones. Cada una de ellas tiene su función y no puede existir una sin las demás. Todos los procesos en los que el ser humano participa ya sea una empresa, un gobierno un país, una institución o una ONG están interrelacionados. Para comprender este mundo tan complejo, se tiene que dividir las partes que trabajan en él y analizar cada una de ellas por separado. De esta manera y solo así, se conseguiría entender el global del mundo.

Los programas de elementos finitos trabajan de manera similar. En una primera instancia se les introduce un programa con un alto grado de complejidad en el cálculo. Estos programas no son capaces de resolver el problema en conjunto. Necesitan de subdivisiones sobre las cuales realizar sus cálculos.

Existen dos tipos de problemas en el cálculo mediante elementos finitos. Por un lado se observan los discretos que son aquellos que se pueden dividir en un número finito de elementos. Por otro, se encuentran los continuos que son aquellos que van variando en función de los anteriores y finalmente solo se pueden resolver utilizando un número infinito de componentes.

Si bien es cierto que existen procesos que con la utilización de una simple fórmula se consiguen obtener resultados que se aproximan con gran exactitud a la realidad, lo normal es que los procesos haya que subdividirlos en partes más pequeñas sobre las cuales realizar los cálculos. Aquí entran los programas de elementos finitos

Gracias a las altas velocidades de procesamiento de información de los ordenadores modernos, se tiene la capacidad de llevar a cabo en un ordenador personal millones de operaciones en cuestión de segundos. Cuanta mayor capacidad de procesamiento tenga el ordenador (mayor número de núcleos y mayor capacidad por núcleo), menos se tardará en obtener los resultados del cálculo.

El método con el nombre de elementos finitos es un nombre asignado recientemente. Sin embargo, el hombre ha utilizado métodos de discretización para resolver problemas ingenieriles o físicos. Una de las primeras referencias en las que probablemente se utilizó el método de los elementos finitos fue en la construcción de las pirámides de Egipto. Gracias a la discretización, los egipcios conseguían calcular el volumen de las pirámides. De la misma manera, en China en el siglo IV D.C se consiguió una primera aproximación del número Pi.

El método tal y como se conoce hoy en día está muy relacionado con el cálculo estructural y aeroespacial. Se les atribuye a Turner, Clough, Martin y Topp el nombre de método de elementos finitos como tal. Estos ingenieros utilizaron la aplicación de elementos finitos simples al análisis de estructuras aeronáuticas.

Debido a su gran interés como herramienta de resolución de cálculo, este método difundió gran interés entre los matemáticos. Gracias a ello, se han escrito un gran

número de publicaciones que han propiciado un rápido avance del método. Hoy en día continúan apareciendo innumerables trabajos de investigación en el campo de la industria que utilizan este método. El presente documento es un ejemplo de ello.

Con respecto al funcionamiento de este método, se debe mencionar que las partes que componen el problema se dividen en elementos que pueden ser rectos o curvos. En el caso del presente estudio, los elementos se dividen en formas tetragonales para evitar excesivas deformaciones en los elementos que originen un fallo en el método. Este método es muy recomendable para ensayos con geometrías complicadas. Se utilizan interpolaciones que hacen variar una incógnita dentro de los elementos. Estas incógnitas son los desplazamientos que sufren los elementos en los que está subdividido el problema (nodos). Una vez el programa ha calculado los desplazamientos, hace uso de la matriz de rigidez y calcula las tensiones.

Desglosando el proceso de elementos finitos (MEF), podemos observar diferentes etapas:

- Preparación: Proceso en el cual se crea el modelo para el cálculo. Incluye la definición de las geometrías, la asignación de materiales, las cargas exteriores y las interacciones a las que está sometido el modelo.
- Cálculo: Etapa en la que se definen los elementos en los que se va a subdividir el modelo, se introducirá el tipo de cálculo a realizar (mediante un “step” dinámico estático...)
- Análisis: Parte del proceso en la cual se pueden ver los resultados obtenidos de nuestro modelo con las condiciones que han sido impuestas.

El programa Abaqus de SIMULIA lo conforman 5 tipos de productos de software:

- Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment): Este software se utiliza para realizar modelos y conseguir los análisis de componentes mecánicos y ensamblajes. Gracias a él, también se pueden visualizar los resultados del modelo de elementos finitos. Existe una subdivisión de Abaqus/CAE en la que se pueden abrir independientemente el visor de Abaqus sin necesidad de tener abierto todo el programa. Esta versión es la idónea en caso de querer analizar una gran cantidad de odbc y comparar unos con otros. La interfaz de desarrollo es muy intuitiva e integra todos los módulos necesarios para realizar el análisis (se comentarán posteriormente en este documento).  
Otro de los beneficios es que el software CAE permite importar modelos de tipo CAD. En el caso de tener piezas o conjuntos de geometría complicada suele realizarse la pieza en otro programa (por ejemplo Solid Edge) y posteriormente se importa al CAE para poder realizar los análisis convenientes.
- Abaqus/Standard: Es la solución tecnológica que propone Abaqus para realizar análisis estáticos y análisis dinámicos de bajas velocidades en donde las soluciones de los niveles de tensión son muy precisas y de importancia crítica para el usuario. Mediante una única simulación, este software da la posibilidad de analizar un modelo tanto en dominios de tiempo como de frecuencia.



Los resultados en cualquier punto del trabajo de Abaqus Standard pueden ser retomados en cualquier momento por Abaqus/Explicit. También puede ocurrir lo contrario. Cualquier análisis creado en la versión Explicit puede continuarse en la versión Standard.

- Abaqus/Explicit: Este software de elementos finitos es particularmente práctico para realizar estudios dinámicos transitorios como choques de vehículos o impactos balísticos. La habilidad del Explicit de manejar con gran eficiencia comportamientos no lineales, tales como el contacto, lo hace muy atractivo para la simulación de eventos cuasi estáticos.  
La flexibilidad que predomina entre el Standard y el Explicit, hace que se puedan utilizar ambos en aquellas partes con necesidades de altas velocidades. Lo que no es capaz de solucionar la versión Explicit lo conseguirá resolver la versión Standard y viceversa.
- Abaqus/CFD (Computational Fluid Dynamics): Como indica su nombre, este software se utiliza para el manejo de fluidos. Aporta gran soporte al pre-proceso y post-proceso dotado en la versión CAE. Sirve para solucionar básicamente tres tipos de problemas de fluidos:
  - Régimen laminar y turbulento: Ya sea de fluidos internos o externos en un estado estacionario o transitorio. Abarca un amplio rango de números de Reynolds. Incluye complejas geometrías y problemas inducidos por variación de fuerzas distribuidas.
  - Termo-convección: Abarca los problemas que incluyen transferencia de calor y requieren de la ecuación de la energía. Este tipo de problemas incluyen también transferencia de calor en régimen turbulento con un amplio rango de números de Prandtl.
  - Deformación de la malla ALE: Este software incluye la habilidad de llevar a cabo análisis de mallas deformadas. Para ello utiliza el lagrangiano-euleriano arbitrario (ALE). Gracias a este método, se describen las ecuaciones de movimiento, transferencia de calor y transporte turbulento.
- Abaqus/Electromagnetic: Este software de SIMULIA es capaz de resolver problemas que se componen de estados estáticos de conducción eléctrica, fenómenos piezoeléctricos y corrientes Eddy de bajas frecuencias.

## 2.5 Abaqus versión 6.12

### 2.5.1 Funcionamiento del software

Abaqus es un programa informático que utiliza el método de elementos finitos para solucionar los problemas que el usuario le introduce. Fue lanzado al mercado en el año 1978. Su creador fue el estadounidense David Hibbitt. La empresa que lo lanzó al mercado fue Hibbitt & Karlsson inc. Hoy en día el producto es el que da nombre a la empresa. Inicialmente hicieron falta 15.000 líneas de código fortran para que el

programa pudiese trabajar con elementos de tipo beam, gasp, truss y sphex. El programa no comenzó a denominarse Abaqus hasta una clase impartida por el Dr. Hibbitt en 1982. Su compañía comenzó con dos personas en los años 70 y ha ido adquiriendo empleados hasta llegar a más de 400 empleados al comienzo del siglo XXI.

En la actualidad este programa se utiliza para resolver problemas de gran complejidad en el mundo de la ingeniería, como pueden ser: resistencia de materiales, fractura, vibraciones o en el caso de este documento, de impacto.

Para conseguir que este programa funcione se deben realizar diferentes procesos. Cada uno de ellos es un módulo independiente. Cuanto más exacta sea la información que se introduce en el programa, mayor exactitud de resultados se obtendrá.

Para conseguir llevar a cabo un modelo y analizarlo mediante este programa, se tienen que realizar los diferentes módulos en los que está dividido el programa. Los módulos suelen ser dependientes de los anteriores. Por lo que para poder llevar a cabo uno, es necesario tener realizados los anteriores. El programa se divide en 11 módulos diferentes. Debido a que la versión es la 6.12, hay dos módulos que son muy recientes y para el caso de este documento no van a ser necesarios. A continuación se explican los módulos en los que está dividido el programa.

- “Part” (geometría): Para comenzar a trabajar en cualquier modelo, es necesario introducir la geometría. La complejidad de esta dependerá del modelo real que se desea analizar. Se debe representar la geometría tal y como es en la realidad. Si se tuviese un conjunto muy complejo de modelar, se podría hacer uso de una importación de un modelo realizado en CAD. De esta manera, sería más sencillo imitar la geometría real de un conjunto complejo.
- “Property” (material): En este apartado hay que introducir el material que se va a utilizar. Para ello se introducen los parámetros que lo caracterizan. En el caso de los metales es muy simple pues únicamente hay que introducir densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson. Sin embargo el problema a desarrollar en este documento requiere de la utilización del Kevlar 29. Debido a que es muy complejo introducir las características de este material a base de parámetros, se introducirá a través de una serie de líneas de código escrito en lenguaje Fortran. Para añadir este material, en el módulo “part”, crearemos un “user material”.

Una vez se han introducido los materiales que se van a utilizar, es necesario asignarlos. Para ello se selecciona una pieza creada en el modelo “part” y se asignará el material correspondiente.

- “Assembly” (ensamblaje): El modelo creado puede estar formado por varias piezas. En el conjunto, cada una de las piezas tiene una posición determinada. En este módulo se trata de introducir la posición relativa de cada una de las piezas respecto al resto del conjunto.
- “Step”: En este módulo se va a definir el tipo de análisis que se va a llevar a cabo. Para ello se crea en caso de necesidades estáticas un “step” de ese tipo y si se

necesita un "step" dinámico, habrá que introducir el tiempo total del ensayo y los incrementos.

- "Interaction" (interacciones): Como se ha mencionado anteriormente, el modelo que se desea analizar puede estar constituido por diferentes partes de distintos materiales. Lo que se consigue mediante este módulo es indicar las interacciones o contactos que sufren los cuerpos entre sí.
- "Load" (cargas): Todo sistema está compuesto de un conjunto geométrico sometido a ciertas cargas. Estas pueden ser de tipo estático, dinámico o de transferencia de calor. Todas las cargas a las que está sometido el sistema se tienen que añadir en este apartado.
- "Mesh" (mallado): El programa Abaqus es un software que utiliza el método de elementos finitos. Como se ha explicado en apartados anteriores, se trata de subdividir el problema inicial en partes más pequeñas sobre las que poder realizar los cálculos. Estas divisiones se realizan en este módulo. Existen dos tipos de versiones. La completa y la de estudiantes. Esta última se diferencia de la versión original en que está limitada a 1000 nodos. Lógicamente cuantas más divisiones se realicen en el modelo, mayor tiempo de cálculo se necesitará hasta conseguir los resultados finales. Sin embargo los resultados serán más próximos a los reales
- "Optimization" (optimización): En este módulo se utiliza una interfaz gráfica para la configuración y ejecución de tareas de optimización y flujos de trabajo. De la misma manera, en este apartado se realizan las comprobaciones de coherencia.
- "Job" (trabajo): En algún momento es necesario crear un archivo en el cual se comiencen a realizar los cálculos. Esto se hace en el apartado "job". En caso de necesitar introducir el material a partir de un código, se deberá escribir el código en un archivo de tipo inp. Si esto fuera necesario, el usuario deberá utilizar un compilador externo que realice los cálculos necesarios.
- "Visualization" (visualización): El software creado por SIMULIA incluye un apartado de visualización de resultados. En él se pueden ver las tensiones deformaciones velocidades... del modelo con las condiciones introducidas en los módulos anteriores.

Este programa de elementos finitos, no trabaja introduciendo unidades. Por lo tanto hay que ser coherente con las unidades que se introducen. Lo normal es utilizar el Sistema Internacional de Unidades. Sin embargo se pueden introducir los datos en otro sistema métrico. A continuación se adjunta una tabla con las unidades que se deben introducir.

Cantidad	SI	SI(mm)	US Units (ft)
Distancia	M	Mm	Ft
Fuerza	N	N	Lbf
Masa	Kg	Ton ( $10^3$ kg)	Slug
Tiempo	S	S	S
Tensión	Pa ( $\text{N/m}^2$ )	MPa ( $\text{N/mm}^2$ )	Lbf/ft <sup>2</sup>
Energía	J	mJ ( $10^{-3}$ J)	Ft lbf
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	Ton/mm <sup>3</sup>	Slug/ft <sup>3</sup>

Tabla 2: Unidades a introducir en el software Abaqus

Como se puede observar, existen diferentes sistemas de unidades. En caso de que el usuario este trabajando en el SI y por un descuido introduzca una unidad en mm, deberá o bien cambiar las unidades a metros para que las unidades sigan cuadrando o analizar los resultados en función de las unidades que haya introducido. Existirán valores que sean superiores a los que deberían haber salido como por ejemplo las tensiones.

En el modelo del presente documento se han introducido todos los datos en el Sistema internacional. Los datos introducidos han sido distancias, velocidades ( $\frac{m}{s}$ ), densidad y módulo de elasticidad (Pa).

### 2.5.2 Conceptos teóricos del daño por impacto sobre placas compuestas en Abaqus

Los materiales compuestos tienen una gran aplicación en innumerables campos de interés actual. Para poder estudiarlos mediante un software de elementos finitos, hay que conseguir modelarlos. Para afrontar el problema se ha de comenzar con un enfoque teórico. Como se ha mencionado a lo largo del documento, los materiales compuestos no son simples de modelar. Para ello se suelen utilizar subrutinas que definen el material.

Las condiciones de impacto “hard contact” se modelan bajo la premisa de que en el momento del impacto, las dos superficies entran en contacto simultáneamente y adquieren la misma velocidad en la dirección del impacto. Esto es esencial en cualquier modelo discreto. La precisión de la representación física de efectos locales es dependiente del modelo espacial tomado. Hay que destacar que en el impacto plástico esta premisa es local y no general. Se asume que en el impacto la energía es disipada por algún mecanismo que no se ha modelado y cuya escala espacio-temporal es infinitesimal en comparación con la del modelo discreto.

El concepto de impacto plástico es diferente al coeficiente de restitución. El método que se utiliza para calcular impactos está específicamente diseñado para permitir tanto detalle local como sea necesario. Normalmente durante el procedimiento de integración se mantiene el balance de energía en términos de mecanismos discretos

de la energía de los mecanismos. Así los saltos instantáneos tanto de velocidades como de aceleraciones implican que hay otro sistema de ecuaciones que gobiernan en el cálculo de las soluciones durante el impacto.

Para conseguir encontrar las ecuaciones que gobiernan las situaciones de impacto, se asume que en un tiempo  $t_0$ , una parte de la superficie de cada uno de los cuerpos (A y B) entra en contacto. Las velocidades y aceleraciones justo antes del impacto se denotan como  $\dot{u}_{AI}$ ,  $\dot{u}_{BI}$ ,  $\ddot{u}_A$ ,  $\ddot{u}_B$ . La premisa de impacto plástico requiere que los puntos correspondientes adquieran la misma velocidad y aceleración en el momento del impacto y en la misma dirección de este. Por lo que para un tiempo  $t_0^+$  se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} n \cdot \dot{u}_{AI} &= n \cdot \dot{u}_{BI} \\ n \cdot \ddot{u}_{AI} &= n \cdot \ddot{u}_{BI} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Siendo  $n$  la normal a la superficie de contacto de I. Para lograr conseguir el salto en el tiempo  $t_0$  se tiene que escribir  $\Delta \dot{u} = \dot{u}^+ - \dot{u}^-$ . Por lo que ahora el sistema de ecuaciones adopta la siguiente expresión:

$$n \cdot (\dot{u}_{AI}^- + \Delta \dot{u}_{AI}) = n \cdot (\dot{u}_{BI}^- + \Delta \dot{u}_{BI}) \quad (3.2)$$

Se sabe que la componente de la fuerza por unidad de área entre dos cuerpos alrededor de I en la dirección perpendicular  $n$ ,  $N_I$ , debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} N_A^I &= -N_B^I \text{ para } t \geq t_0 \\ N_A^I &= N_B^I = 0 \text{ para } t < t_0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ya que los saltos de velocidad finita que ocurren en el momento del impacto son en incrementos de tiempo infinitesimales (en comparación con la escala de tiempo de la simulación completa), durante el incremento infinitesimal ente  $t_0^-$  y  $t_0^+$ ,  $N_I$  es la fuerza dominante del sistema junto con las fuerzas de Alambert. Esto simplifica la ecuación de los trabajos virtuales durante el incremento infinitesimal a:

$$\sum_{A,B} \left[ \int_V \rho \ddot{u} \cdot \delta u \, dV \right] + \int_I N_A n \cdot \delta u_A \, dS + \int_I N_B n \cdot \delta u_B \, dS = 0 \quad (3.4)$$

Si se realiza la integral desde  $t_0^-$  a  $t_0^+$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{A,B} \left[ \int_V \int_{t_0^-}^{t_0^+} \rho \ddot{u} \cdot \delta u \, dV \right] + \int_I \int_{t_0^-}^{t_0^+} (N_A n \cdot \delta u_A \, dS + N_B n \cdot \delta u_B \, dS) \, dS = 0 \quad (3.5)$$

Se conoce que  $n \cdot \delta u_A = n \cdot \delta u_B$  para el tiempo  $t_0$  y  $N_B = -N_A$ , por lo que el segundo término de la ecuación 3.5 es cero. Sin embargo la restricción de la ecuación 3.2 se tiene que cumplir. Para ello se aumenta la ecuación 3.5 mediante un multiplicador de Lagrange  $H$ . Así la ecuación 3.5 pasa a tener la siguiente forma.

$$\sum_{A,B} \left[ \int_V \rho \Delta \dot{u} \cdot \delta u \, dV \right] + \int_I \delta [H \, n \cdot (\dot{u}_{AI} + \Delta \dot{u}_{AI} - \dot{u}_{BI} + \Delta \dot{u}_{BI})] \, dS$$

Como el primer término se ha integrado ente  $t_0^-$  y  $t_0^+$ , el resultado final se corresponde al término de la velocidad de salto. Si se toma la variación del segundo término y que únicamente  $n$  puede rotar en el intervalo de tiempo infinitesimal porque no hay discontinuidad en el desplazamiento, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \sum_{A,B} \left[ \int_V \rho \Delta \dot{u} \cdot \delta u \, dV \right] + \int_I H \, n \cdot (\delta u_{AI} - \delta u_{BI}) \, dS + \int_I (\Delta \dot{u}_{AI} - \Delta \dot{u}_{BI}) \cdot n \delta H dS \\ = - \int_I (\dot{u}_{AI} - \dot{u}_{BI}) \cdot n \delta H dS \end{aligned} \quad (3.6)$$

Esta ecuación es la condición del impulso que puede resolverse para la velocidad de salto  $\Delta \dot{u}$  en todos los nodos. La solución también proporciona el impulso por unidad de área,  $H$  (la integral de tiempo de la presión entre las superficies a lo largo del periodo infinitesimal del impacto). Gracias a la ecuación de equilibrio escrita para el tiempo  $t_0^+$  e incluyendo las restricciones  $n \cdot (\ddot{u}_{AI} - \ddot{u}_{BI}) = 0$ , se pueden obtener las aceleraciones inmediatamente después del impacto.

Cuando los elementos unidos a los nodos que impactan tienen matrices consistentes de masa, las ecuaciones darán unos saltos de velocidad y aceleración a lo largo de esa parte del modelo y no solo en los nodos propios. Para estas condiciones iniciales en el instante  $t_0^+$  las ecuaciones que se utilizan normalmente en estos casos pueden continuar aumentadas por la restricción  $\int_I n \cdot (\dot{u}_A - \dot{u}_B) dS = 0$ , que viene impuesta por un multiplicador de Lagrange. Como este multiplicador representa la interfaz de la presión, su valor se monitoriza para ver si existe una separación. Si se ve un valor negativo, la restricción se elimina. En este caso se necesitaría otra solución para calcular las aceleraciones iniciales justo después de eliminar la restricción, aunque se puede afirmar que no habrá saltos de velocidad en ese instante. La separación puede darse inmediatamente después del impacto. Si esta situación se da, las ecuaciones de equilibrio se resolverán sin la restricción para encontrar las correspondientes aceleraciones.

En un problema real, el impacto y la separación ocurrirán en algún punto intermedio en una franja de tiempo. Para acomodarse a esta situación, Abaqus primero resuelve el primer paso ignorando el impacto. A continuación hace una interpolación lineal para calcular el tiempo de separación de todos los puntos que cambian en el incremento y de nuevo vuelve a solucionar el incremento para ese nuevo tiempo. Todos los cambios en la superficie de contacto se supone que se producen en el punto de interpolación lineal.

Normalmente, el periodo de tiempo que se utiliza para calcular las soluciones de un impacto es de un orden de magnitud menor que el evento precedente. Como hay una alta frecuencia de sonido generada por la disipación durante el impacto, la franja

de tiempo del periodo en el que se están realizando los cálculos, se expande automáticamente mediante un algoritmo. Consecuentemente la solución es acorde a los nuevos datos obtenidos gracias al algoritmo.

### 3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

#### 3.1 Introducción

Para conseguir averiguar los datos de deformaciones, tensiones, velocidades, velocidades de rotura y demás datos expuestos en los apartados anteriores, se hará uso del programa Abaqus 6.12. Este es un programa que utiliza el método de los elementos finitos. Gracias a él, se conseguirá realizar diferentes ensayos mediante los cuales se podrán obtener ciertos resultados y analizarlos.

Este programa de elementos finitos va a servir para crear una realidad virtual en la cual se creará un modelo con las características de un experimento ya realizado en laboratorio. Tomando como base los datos de este experimentos, se tratará de calibrar el experimento para que los datos sean lo más reales posibles.

En el artículo creado por Horace, se describe el impacto y la penetración de armaduras. Para ello utiliza armas de gas comprimido de proyectiles FSP en rangos de velocidades de entre  $200 \frac{m}{s}$  y  $750 \frac{m}{s}$ . Para el cálculo del límite balístico, se realizan disparos con incrementos de velocidades de  $20 \frac{m}{s}$  hasta lograr calcular el límite. Se presentan los datos de los impactos junto a sus velocidades residuales. Finalmente concluye que según se aumenta el espesor de la placa de kevlar que recibe el impacto, el límite balístico aumenta.

Una vez se tenga calibrado el programa, se procederá únicamente a variar la geometría del proyectil. La manera idónea de realizar este trabajo de fin de grado sería mediante un análisis experimental en el cual se disparen los proyectiles en una sala de tiro y posteriormente analizar los resultados obtenidos. Sin embargo debido a que en la universidad no está permitido la utilización de pólvora y a que el experimento requeriría un gran desembolso económico, se realizará mediante un programa informático. De esta manera se cumplirán tanto los requisitos de la universidad como un ahorro económico considerable.

La validación de los resultados experimentales es imprescindible para poder afirmar que los datos obtenidos con este ensayo son lo más próximos posibles a la realidad.



### 3.2 Características y modelación del ensayo

Para la realización del modelo se han tenido que seguir las pautas que se han descrito en el apartado 2.5. Se han tomado las propiedades del K29 indicadas en la tabla 1. Para la realización del primer modelo, se tomaron las medidas del proyectil indicadas en la ilustración tres. Para los modelos posteriores, lo único que se tuvo que realizar fue un cambio en el ángulo del proyectil. Se han creado 6 modelos diferentes con distintos ángulos de pico ( $21^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ).

Para que el modelo fuese lo más real posible, se ha realizado un modelo tridimensional. Inicialmente se pensó en realizar un modelo basado en una estructura tipo “Shell” pero fue descartado debido a los errores que hubiese supuesto dicha simplificación.

#### ➤ Módulo “part”

Para la creación de este modelo hubo que realizar un estudio previo de la literatura de los proyectiles FSP. En el experimento realizado por H. Billon, se utiliza un calibre 22. Es por esto que se ha tomado las medidas homologadas del FSP del calibre 22.

En el módulo “part” se crea una pieza por revolución. Para ello se crea el perfil del proyectil. Lo único que habrá que cambiar cuando se desee modificar la geometría será este perfil. Como la bala tiene una revolución de  $360^\circ$ , este es el número que se introduce en la revolución. A continuación se muestra una ilustración del perfil introducido en el módulo “part”. Hay que tener en cuenta que difieren las medidas de la ilustración 3 en que estas están expresadas en pulgadas y las del modelo creado están en metros.

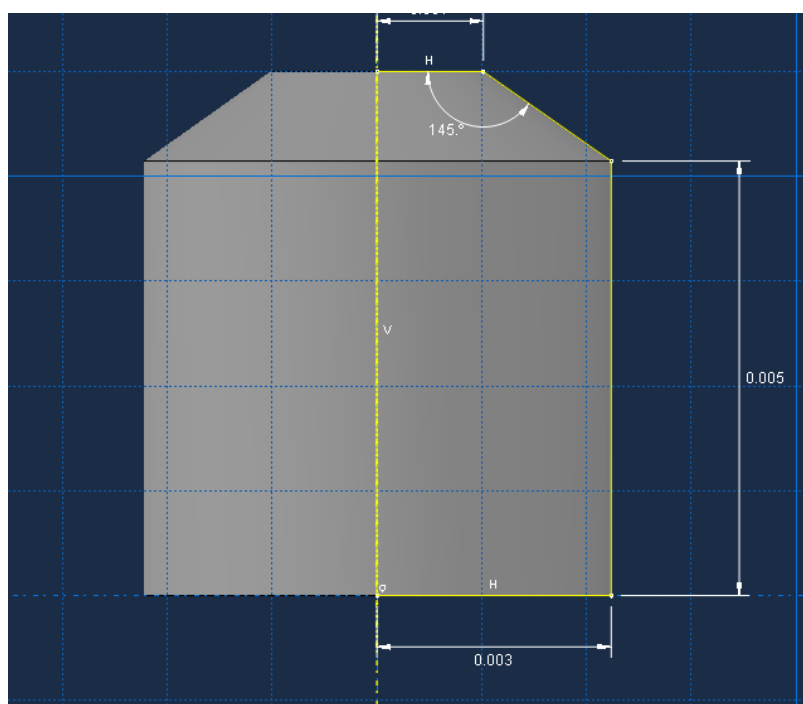


Ilustración 5: Geometría del proyectil en Abaqus

La placa que sufrirá el impacto se crea mediante una extrusión. Las medidas han de corresponder a las de los experimentos encontrados en la literatura de H. Billon. Esto es una placa cuadrada de 20,3 cm de lado por 1,02 cm de espesor. Como la zona central será la que reciba el impacto, se crea una partición cuadrada central de 2cm de lado.

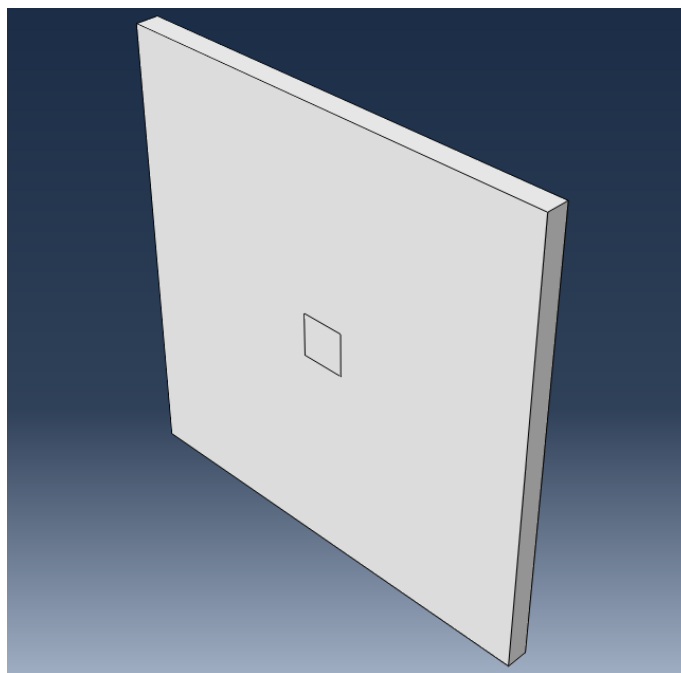


Ilustración 6: Geometría de la placa de Kevlar

#### ➤ **Modulo “property”**

Este es el módulo diseñado para crear el tipo de material. Cada material lo conforman una serie de propiedades que lo hacen único. En el modelo creado, se utilizan dos materiales. El kevlar para la lámina que recibirá el impacto y el acero para el proyectil.

El acero es el material más sencillo de crear. Para ello se introduce en el programa la creación de un material nuevo y se asignan las propiedades del acero. Estas serán: Densidad de  $7800 \frac{kg}{m^3}$ , Módulo de Young de 200 GPa y coeficiente de Poisson de 0,3.

El Kevlar es un material compuesto. Debido a esta característica, es necesaria la utilización una subrutina VUMAT escrita en lenguaje fortran. Dentro de esta, se deberán realizar una serie de cambios para que el límite balístico coincida con el encontrado en la literatura.

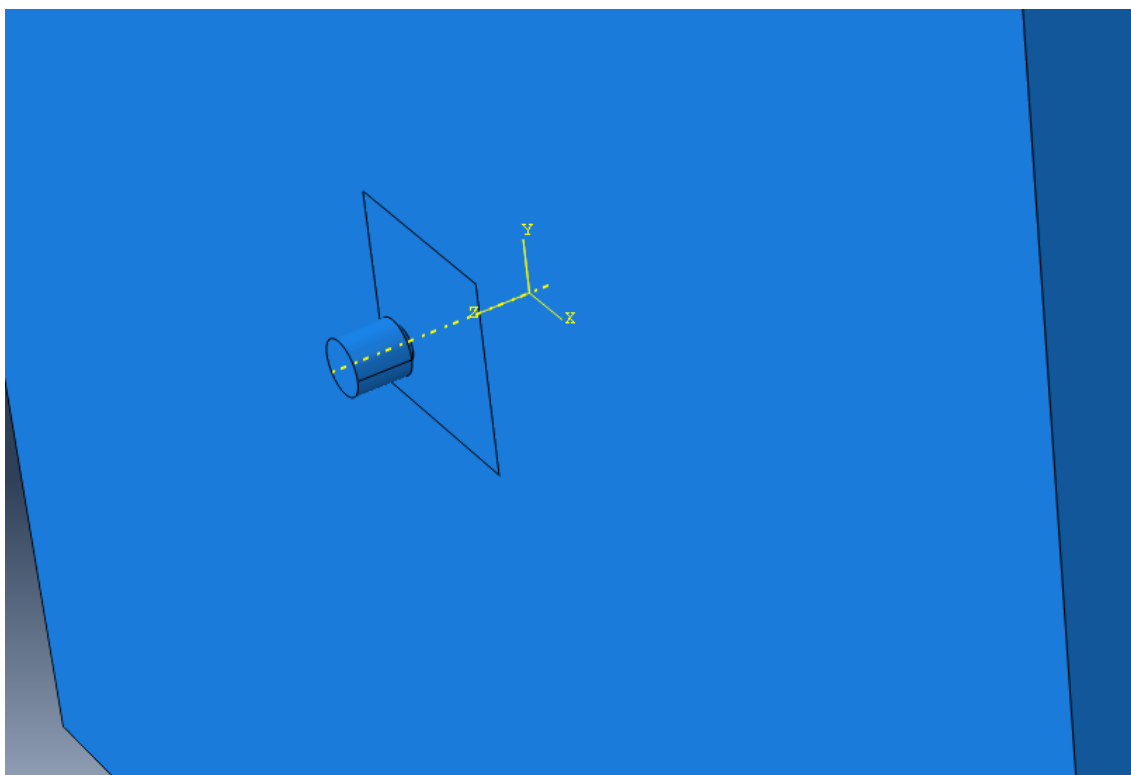
Dentro del programa Abaqus, se ha de introducir *Density*, *Depvar* y *User material*. Con ellos se introducen la densidad, el control de las variables de la subrutina y las propiedades elásticas del material.

Una vez se han añadido los dos materiales, se deben crear dos secciones y asignar a cada componente su sección correspondiente. Esto es, al proyectil se le asigna la sección de acero y a la placa la sección de kevlar.

### ➤ Módulo “Assembly”

Este es el módulo en el cual se sitúan las dos partes que conforman el modelo en el espacio. Debido a que no se desea que la bala se desvíe ni reduzca su velocidad antes del impacto, se tendrá que situar muy próxima a la placa. Primero se sitúa la placa de Kevlar en el plano XY. Posteriormente se coloca el centro de la placa en el origen de coordenadas. Para que se pueda ver mejor sin necesidad de realizar cambios en la vista, posicionaremos la bala en el eje z. Su dirección de movimiento será el vector  $(0, 0, -1)$ . Esto es, la velocidad que se introduzca en el programa tendrá que ir precedida de un signo negativo para que de esta manera avance en dirección a la placa.

Dentro del programa existen ciertos comandos que habrá que utilizar para conseguir colocar cada pieza en su sitio. Los más comunes son el de traslación y el de rotación de la pieza.



*Ilustración 7: Resultado final tras el Assembly*

### ➤ Módulo “step”

En este módulo, se trata de introducir en el programa el tipo de análisis que se va a llevar a cabo. Como este caso es un impacto, el análisis a realizar será un análisis dinámico. Para que el programa funcione, se ha de introducir un primer “step” denominado inicial. Posteriormente se crea un paso de tipo dinámico (dynamic explicit). Debido a que se tiene una placa de espesor considerable, el tiempo que se introducirá en el “step” será alto en relación a otros programas pero no dejará de ser del orden de milisegundos. El motivo por el cual se ha de escoger un tiempo alto, es porque para el cálculo del límite balístico, el proyectil tarda más tiempo en atravesar la placa. Por tanto se desea evitar a toda costa que el análisis quede

incompleto. En este módulo también se van a introducir las variables que queremos que el programa calcule.

### ➤ Módulo “Interaction”

En este módulo hay que definir las propiedades de contacto entre las geometrías creadas. Inicialmente se planteó la posibilidad de crear una interacción superficie con superficie. Sin embargo en el caso de que el proyectil rompiera la placa plana, entraría en contacto la superficie de la bala con la segunda capa del Kevlar. Por esto se decidió crear una interacción de “general contact”. De esta manera suponemos que cualquier contacto entre superficies va a tener las mismas condiciones.

El paso previo a asignar el tipo de interacción es asignar las propiedades. Tras una búsqueda en la literatura, se encuentra la ley de Coulomb. Esta estipula que el coeficiente de fricción cinético es independiente de la velocidad de deslizamiento una vez el cuerpo se encuentra en movimiento. En un caso como el estudiado ronda entre 0,2 y 0,3. Realizando indagaciones, se estipula que el coeficiente es aproximable a 0,25 para el cálculo de un impacto de un proyectil sobre una placa plana.

En relación al comportamiento normal, la interacción que mejor representa el comportamiento frente a impacto es la de “hard contact”. Se escoge éste debido a que minimiza la penetración de la superficie esclava dentro de la superficie ama. Tampoco permite la transferencia de tensiones a través de la interacción.

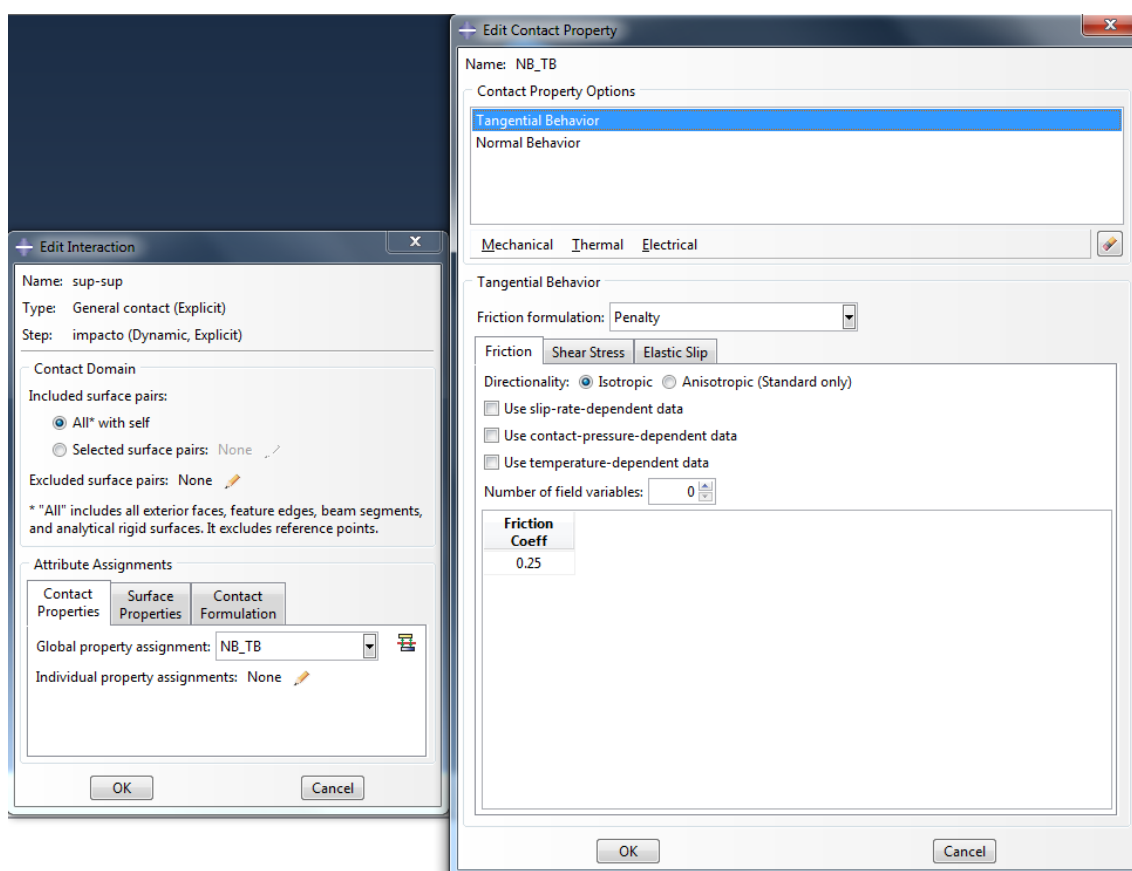


Ilustración 8: Propiedades de interacción del modelo

## ➤ Módulo “load”

En este apartado se definen las condiciones de contorno y las fuerzas a las que está sometido el modelo. En el experimento realizado por H. Billon, la placa plana de kevlar está sujeta en un marco. Esto se traduce en el modelo a un empotramiento de los extremos. De esta manera el modelo informático será lo más parecido al real. Si bien es cierto que en el experimento real las fijaciones pueden fallar y soltarse en un impacto. Esto en el modelo de Abaqus no sucede. Sin embargo en ese posible suceso, el experimento sería fallido y se debería volver a realizar. Por lo que el modelo informático se corresponde perfectamente en este caso al experimento real.

Se necesita dotar a la bala de una velocidad inicial. El problema de incluir la velocidad en este módulo es que el proyectil siempre iría a la velocidad seleccionada. Por esto, en el módulo load, no se coloca la velocidad. En este módulo sí que se puede conseguir que sólo existan movimientos en el eje z. Para ello se limitan los movimientos en los ejes x e y. Asimismo se impiden las rotaciones del proyectil.

Para configurar la velocidad del proyectil, se crea dentro del “step” un campo predeterminado al que se le asigna el nombre de velocidad. Este campo comienza en el “step” inicial y se propaga al “step” impacto. Para el análisis de datos lo único que se deberá hacer es modificar este campo a diferentes velocidades. Como se ha explicado anteriormente, se tendrá que introducir la velocidad con signo negativo para que el proyectil avance hacia la placa de kevlar.

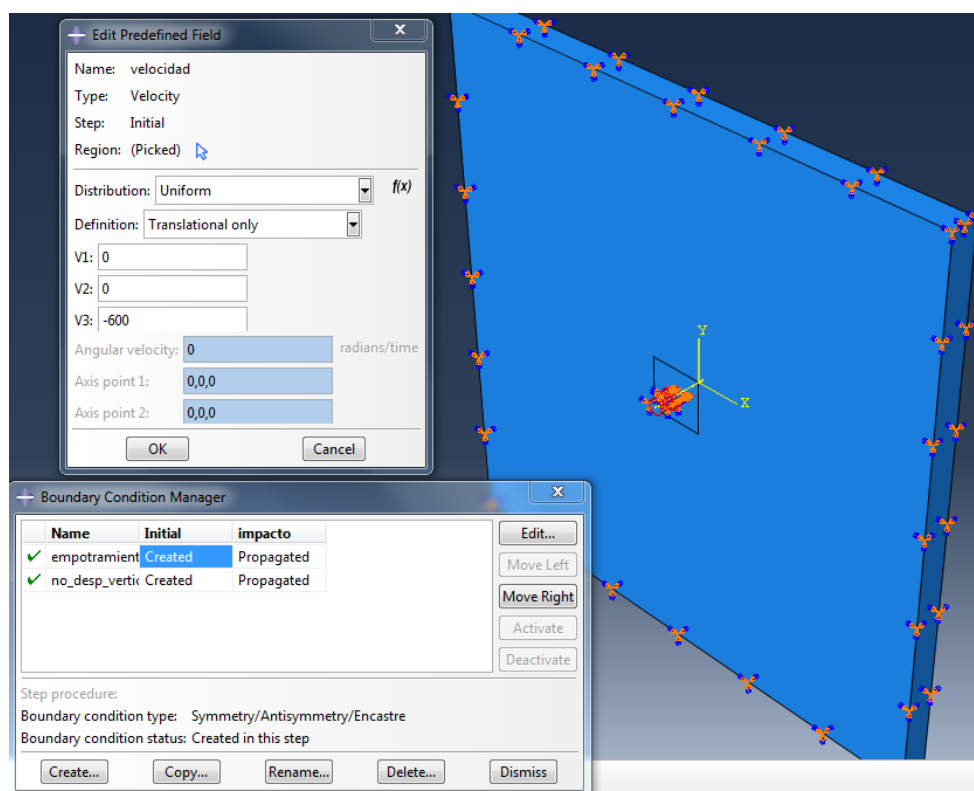


Ilustración 9: Cargas aplicadas y empotramiento del modelo

### ➤ Módulo “mesh”

Este es el módulo en el cual se divide el modelo en elementos de un tamaño lo menor posible sin que se pierda la exactitud. Cuantos más elementos haya, más preciso será el resultado. Inicialmente se creó un mallado de 300.000 elementos para analizar las diferencias con uno de 10.000. El motivo por el cual se desea tener un mallado grande es que de esta forma se produce un ahorro de tiempo y de cálculo. Finalmente se desecha este tipo de mallado puesto que las diferencias con el mallado pequeño eran abismales (en torno a un 100% de diferencia en la velocidad residual).

Finalmente se analizó que entre un mallado de 400.000 nodos y uno de 500.000 había una diferencia menor al 1% en velocidades residuales. Sin embargo el tiempo de cálculo se reducía en varias horas.

Hay que mencionar que en el mallado final de la placa existen dos zonas. El primer cuadrado de 2cm de lado centrado en la placa y el resto. El cuadrado central tiene un tamaño de elementos de 0,001 y en el resto del mallado se tienen elementos tres veces superiores en tamaño, de 0,003. El motivo por el cual en el centro los elementos son menores, es porque es la zona en la cual impacta el proyectil. Por lo tanto se la considera la zona crítica y es en la que se necesita más exactitud.

Para poder realizar esta diferenciación en el mallado, se realizó una partición en el módulo “part”. En este módulo se tuvieron que seleccionar todas las aristas que conforman el cuadrado central y posteriormente asignar el tamaño adecuado.

En último lugar hay que hacer mención al mallado de la bala. Cada vez que se modifica la geometría del proyectil se debe remallar. El tamaño de los elementos que conforman la bala es igual que el de los elementos pequeños del cuadrado central de la placa. Son de 0,001. En el proyectil es donde se van a medir las velocidades residuales por lo que se necesita una buena aproximación, por eso los elementos son de un tamaño reducido.

Cabe destacar que el tipo de elementos utilizados son tetragonales. Esto es debido a que el resto de elementos provocan una gran distorsión al realizar los cálculos. Estas altas distorsiones hacen que no sea posible llegar a un resultado final. Por lo que finalmente se decidió utilizar elementos tetragonales en todos los elementos que conforman el modelo.

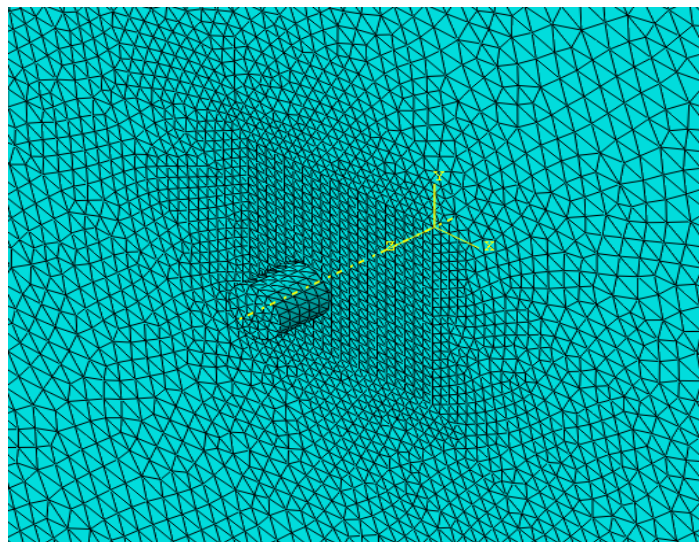


Ilustración 10: Representación del mallado

### ➤ Módulo “Job”

Si no se tuviese que utilizar una subrutina, la utilización de este módulo sería muy simple. Sólo se debería crear un trabajo al que se le asigna un nombre y hacer clic en el comando “submit”. Una vez hecho esto se tendría que esperar a que el programa realizase los cálculos necesarios para poder ver los resultados.

En este caso tenemos una subrutina VUMAT. Es la que define las propiedades del material. Debido a que el kevlar es un material compuesto, se necesita de una subrutina escrita en fortran para definirlo. En el módulo “job” se tiene que crear un archivo de tipo inp con el que poder trabajar. Para ello se pulsa el comando “write input”. Automáticamente se crea este tipo de archivo.

Para realizar los cálculos, se utiliza el programa fortran builder environment for applications running on Intel (R) 64. Una vez abierto el programa se tiene que ubicar la carpeta en la que está situado el archivo .inp. Acto seguido se tiene que escribir: abq6121 job=“nombre del job”.inp user=“nombre del archivo fortran”.for cpus=“numero de cpus que se desee utilizar” inter.

Una vez se ha escrito toda la línea de código, se ha de esperar el tiempo necesario para que el compilador realice los cálculos y obtenga los resultados finales.

```
C:\Users\Yago\Documents\trabajo fin de grado\Primer impacto>abq6121 job=impact_k
evlar.inp user=K29_CN5.for cpus=4 ask_delete=off inter
Abaqus Warning: The .inp or .sim extension has been removed from the job identif
ier
Abaqus JOB impact_kevlar
Abaqus 6.12-1
Abaqus License Manager checked out the following licenses:
Abaqus/Explicit checked out 8 tokens.
<1016 out of 1024 licenses remain available>
Begin Compiling Single Precision Abaqus/Explicit User Subroutines
5/8/2015 6:13:36 PM
End Compiling Single Precision Abaqus/Explicit User Subroutines
5/8/2015 6:13:38 PM
Begin Linking Single Precision Abaqus/Explicit User Subroutines
5/8/2015 6:13:38 PM
Creando biblioteca explicitU.lib y objeto explicitU.exp
End Linking Single Precision Abaqus/Explicit User Subroutines
5/8/2015 6:13:39 PM
Begin Analysis Input File Processor
5/8/2015 6:13:39 PM
Run pre.exe
```

Ilustración 11: Código escrito en el compilador de fortran



### 3.3 Geometrías utilizadas.

#### 3.3.1 FSP empleados

Según el estudio realizado por H. Billon el proyectil en el cual se va a ensayar y calcular el límite balístico es un FSP standard de calibre 22. Para realizar un análisis de la influencia de la geometría, se han tomado como referencia los ángulos de  $21^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ . Estos se han sacado de la literatura científica encontrada en el vigésimo octavo simposio de balística de Atlanta. A continuación se muestran todas las geometrías utilizadas.

- Geometría de  $21^\circ$ : Se corresponde a la geometría de un FSP en punta. Es la más afilada de todas las geometrías utilizadas. Igual que el resto de proyectiles, se ha modelado en Abaqus sin necesidad de importar la geometría de un software CAE. Debido a que en el proyectil original es el de  $35^\circ$ , se mantiene la altura de 0.00518m y desde ese punto se traza la recta que une con la altura máxima. Es por esto que el ángulo es  $20.9^\circ$  en lugar de 21. Tiene un peso de 1,06 gramos.

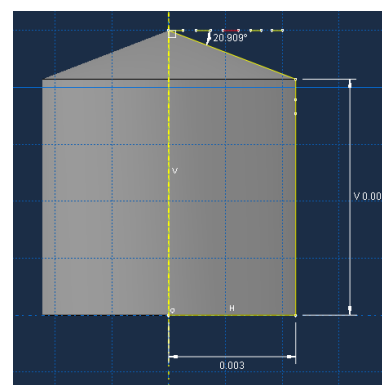
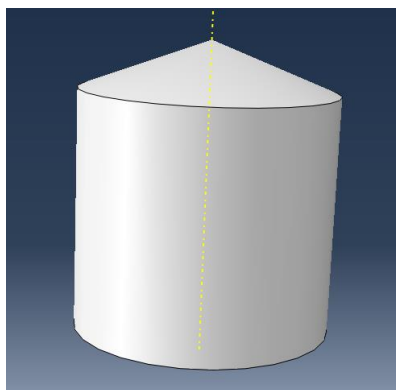


Ilustración 12: FSP geometría  $21^\circ$

- Geometría  $35^\circ$ : Este proyectil es el proyectil Standard de calibre 22. En Estados Unidos, las medidas vienen dadas en pulgadas. Para hacer la conversión al SI se debe saber que una pulgada se corresponde a 2,54cm. Es el proyectil original sobre el cual se calibra el modelo. Este proyectil tiene un peso de 1.11 gramos.

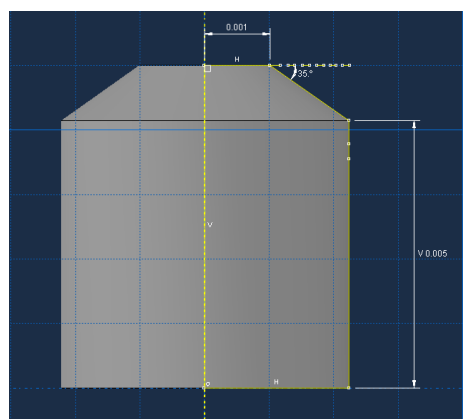
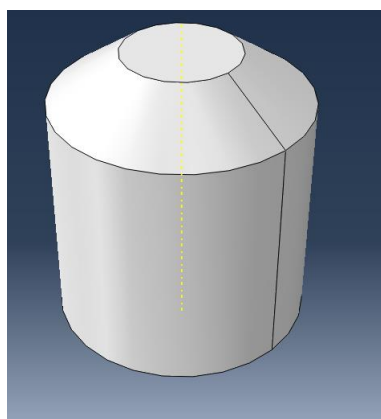


Ilustración 13: FSP geometría  $35^\circ$



- Geometría 45°: Para realizar esta geometría, se ha dejado fija la altura a partir de la cual comienza la diagonal. Esta forma 135° con la vertical. Se ha ido variando el ángulo marcado en todas las figuras pero manteniendo constante la altura. Por lo tanto la primera superficie de impacto del proyectil aumenta. El peso de este proyectil es de 1.13 gramos

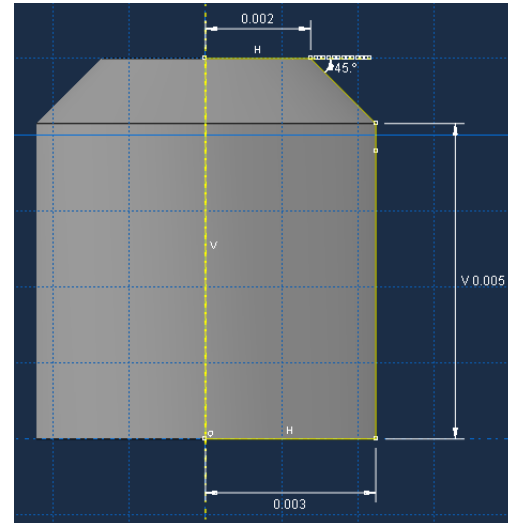
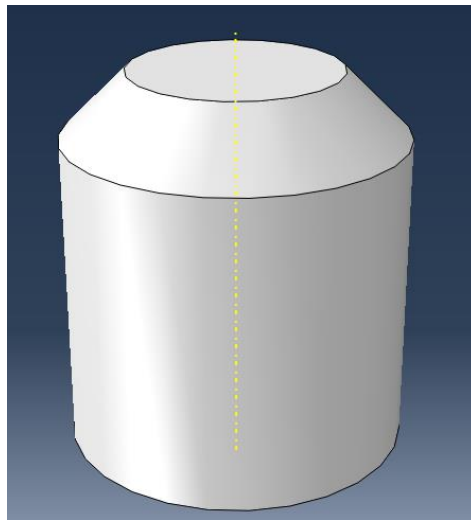


Ilustración 14: FSP geometría 45°

- Geometría 50°: Igual que se hace para la geometría de 45 grados, aquí se fija también la altura y se modifica el ángulo de la diagonal. Ahora hay un ángulo de 140° con la vertical. La superficie primera de impacto del proyectil con el kevlar es mayor que para la geometría de 45°. Su peso es de 1.14 gramos.

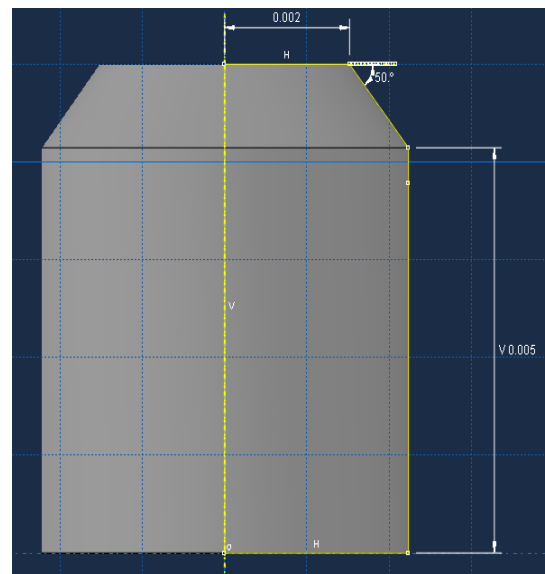
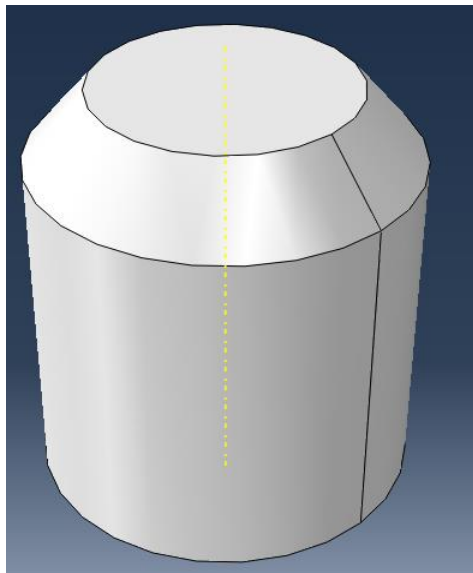


Ilustración 15: FSP geometría 50:

- Geometría 90°: Este proyectil tiene forma cilíndrica. Es el segundo proyectil más pesado. Su aerodinámica no es la más adecuada para un proyectil. Tiene un peso de 1.2 gramos.

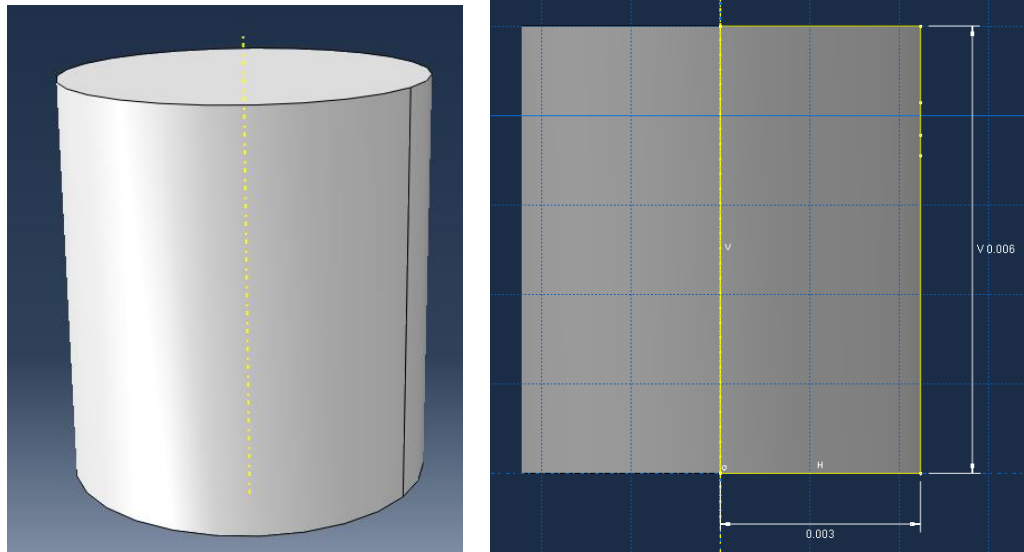


Ilustración 16: FSP geometría 90°

- Geometría 135°: Es el proyectil más pesado pero con peor aerodinámica. A su vez es el que tiene más superficie inicial de contacto con la placa. Va a ser con el que se obtengan peores resultados de límite balístico. Esta geometría tiene un peso de 1.28 gramos.

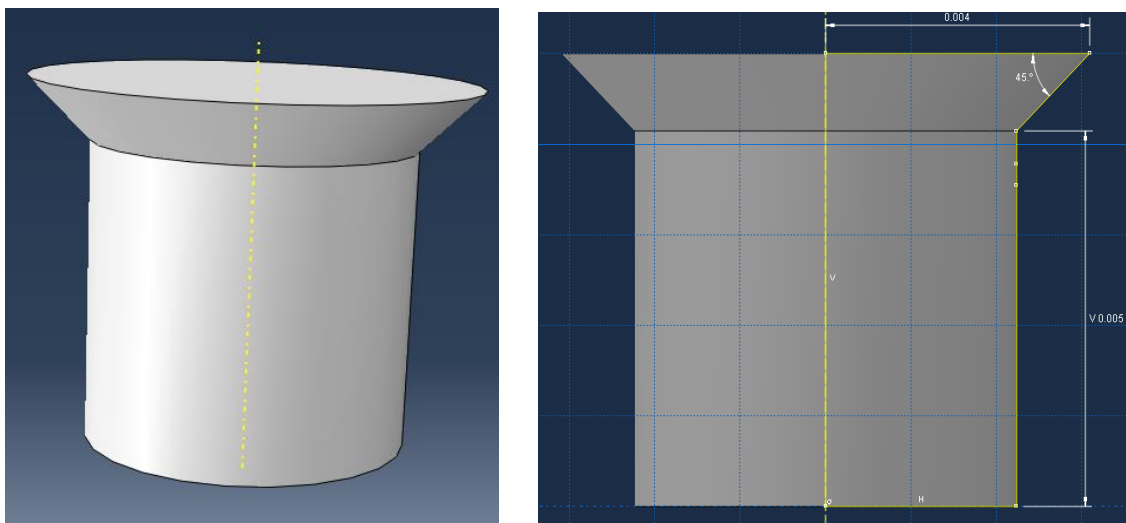


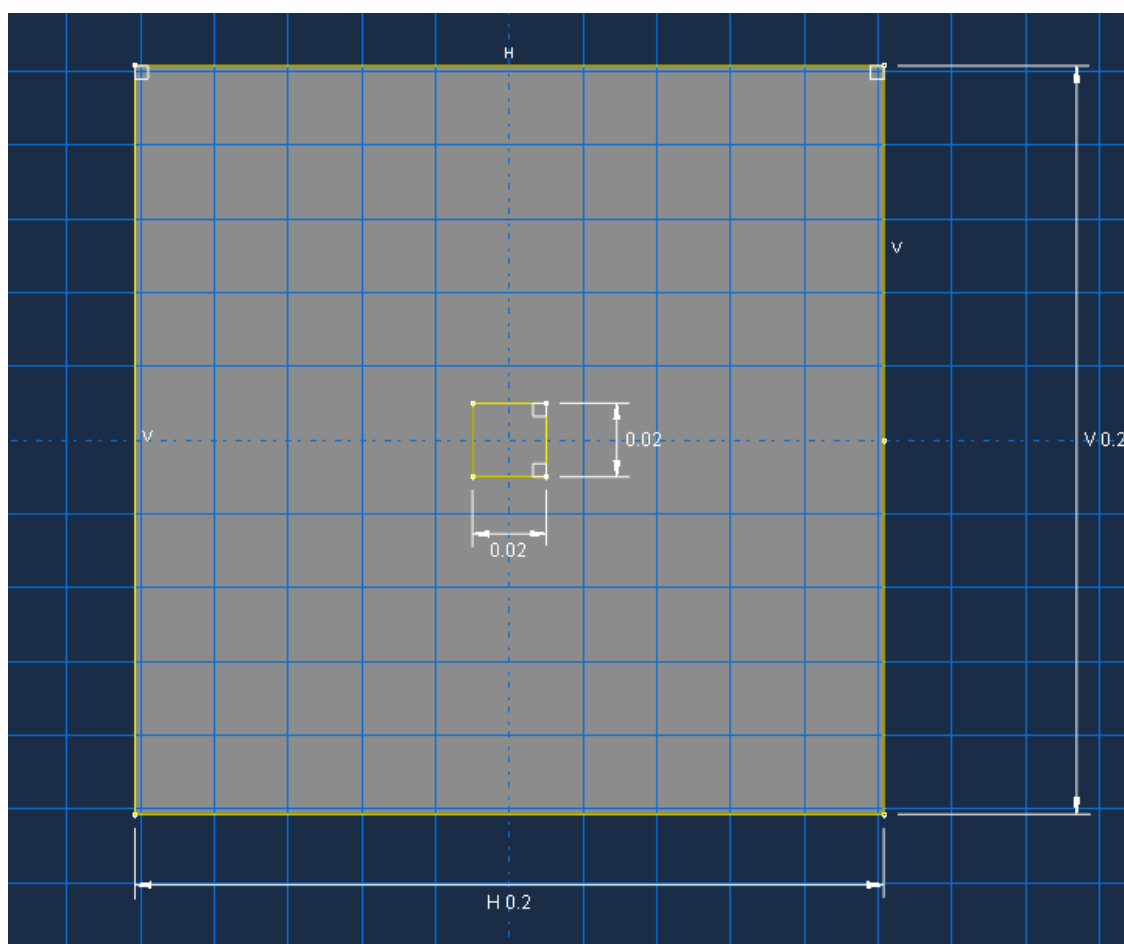
Ilustración 17: FSP geometría 135

### 3.3.2 Geometría de placa utilizada

En el experimento llevado a cabo por H. Billon, se utiliza una placa plana de kevlar. Esta placa tiene forma cuadrada de 20.3cm de lado. El espesor de la placa es de 1.02cm. Para poder realizar el experimento, la placa se ancla a un marco. Esto se corresponde a un empotramiento de la superficie perimetral de la placa. Se conforman como sólidos deformables para poder sufrir una rotura en el impacto del proyectil.

Se realiza una partición como se ha explicado en el apartado 3.3.2. Gracias a la partición conseguiremos obtener mayor precisión a la hora de calcular el límite balístico.

El material se asigna mediante una subrutina VUMAT. En el experimento realizado se utiliza el Kevlar 29, por lo que para la modelación de la placa se asignan las propiedades que conforman este material.



*Ilustración 18: Geometría de la placa*

El resultado final de la geometría de la placa en tres dimensiones se puede ver en la ilustración 6 del apartado 3.2 del presente documento.

### 3.4 Validación del modelo numérico

El paso previo a las modificaciones de la geometría consiste en asegurar que el programa va a parecerse lo máximo posible a la realidad. Debido a que en la escuela politécnica no está permitido el uso de pólvora ni de armas de fuego, se ha tenido que encontrar en la literatura científica un experimento que pueda ser utilizado para la validación de los cálculos a realizar.

Se ha mencionado en varias ocasiones a lo largo de este documento el experimento realizado para el departamento de defensa de la Commonwealth australiana realizado por Horace Billon. En él se puede encontrar una variación del límite balístico en función del espesor de una placa de kevlar 29 que es impactada con un proyectil FSP de 1.1 gramos de masa de calibre 22. A continuación se incluye una tabla con los datos experimentales encontrados en este documento:

Espesor placa (m)	Límite balístico (m/s)
$2.03 \cdot 10^{-2}$	350
$1.02 \cdot 10^{-2}$	300
$5.59 \cdot 10^{-3}$	190
$2.54 \cdot 10^{-3}$	60
$1.02 \cdot 10^{-3}$	15

*Tabla 3: Límites balísticos en función del espesor en experimento de Horace Billon.*

Se ha tomado como referencia el dato de espesor de placa de 1,02cm. Las dimensiones de la placa se especifican en el documento y son las que se han descrito en el apartado 3.3.2.

El objetivo de la validación del experimento consiste en la modificación de los parámetros de deformaciones principales del material hasta conseguir que el límite balístico fuese de 300 m/s. Gracias a la línea de investigación que se está llevando a cabo en el departamento de mecánica, se pudieron obtener los códigos de la subrutina VUMAT que modela el Kevlar 29.

La subrutina VUMAT contiene toda la información acerca del Kevlar 29. Este código permite simular adecuadamente los modos de fallo que aparecen en los materiales compuestos. Para que sea válida en el modelo creado habrá que realizar una calibración de los parámetros. Para ello se modificaran las variables encargadas de acumular las deformaciones:

- St1: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{11}$
- St2: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{22}$
- St3: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{33}$
- St4: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{12}$
- St5: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{13}$
- St6: es la variable encargada de acumular la deformación  $\epsilon_{23}$

En el código utilizado por el departamento los datos que conformaban el código eran los siguientes:  $St1=St2=St3=0.15$  y  $St4=St5=St6=0.1$ . Para la calibración del modelo se tuvieron que modificar estos parámetros hasta encontrar aquellos para los cuales el límite balístico del proyectil creado fuera el que se corresponde al experimento realizado por Horace Billon. Esto es, encontrar los parámetros para los cuales el límite balístico de un proyectil FSP Standard de 1.1 gramos impactando una placa cuadrada de 20.3x20.3cm de lado por 1.02cm de espesor es de 300m/s

Para ello se lanzaron diferentes casos modificando las deformaciones y analizando los resultados. El primer parámetro necesario a analizar fue la velocidad residual. Cuanto mayor fuese la velocidad residual más se deberían subir las deformaciones.

En caso de que el proyectil no rompiera la placa, se tiene que comprobar si subiendo la velocidad a  $301\frac{m}{s}$  la placa rompe. En el supuesto de que a  $300\frac{m}{s}$  el impacto rompiera la protección y a  $301\frac{m}{s}$  también lo hiciese se debería reducir alguna de las deformaciones. Para la combinación en la cual a  $300\frac{m}{s}$  el proyectil rompe la placa y a  $301\frac{m}{s}$  no lo hiciese el modelo ya estaría calibrado.

Para la realización del calibrado, se tuvo en cuenta que la deformación  $St1$  siempre va a ser igual a la de  $St2$  y a la de  $St3$ . Asimismo  $St4$  va a ser igual a  $St5$  y a  $St6$ . Finalmente los valores de las deformaciones para los cuales el modelo va a estar calibrado son:  $St1=St2=St3=0.25$  y  $St4=St5=St6=0.1$ . A continuación se adjunta una tabla con los valores probados hasta conseguir calibrar el modelo.

Modificación de parámetros	Velocidad inicial (m/s)	Rotura placa	Velocidad Residual (m/s)
$St1=St2=St3=0.15$ $St4=St5=St6=0.1$	300	SI	65.6
$St1=St2=St3=0.2$ $St4=St5=St6=0.1$	300	SI	30.72
$St1=St2=St3=0.3$ $St4=St5=St6=0.1$	300	No	
$St1=St2=St3=0.3$ $St4=St5=St6=0.1$	301	No	
$St1=St2=St3=0.25$ $St4=St5=St6=0.1$	300	No	
$St1=St2=St3=0.25$ $St4=St5=St6=0.1$	305	SI	33.0
$St1=St2=St3=0.25$ $St4=St5=St6=0.1$	301	SI	23.12

Tabla 4: Datos de calibración del modelo

Como se puede ver, finalmente para  $300\frac{m}{s}$  el proyectil no rompe la placa pero para  $301\frac{m}{s}$  sí que atraviesa. El límite balístico queda ajustado al experimento real y se puede

afirmar que las operaciones llevadas a cabo en este documento se corresponden con la realidad.

### 3.5 Influencia de los parámetros de la subrutina en el límite balístico

Antes de comenzar a realizar variaciones en las geometrías se decidió hacer un pequeño estudio acerca de la influencia de ciertos parámetros de la subrutina en el resultado final del modelo de impacto. Para ello se decidió realizar una serie de modificaciones de ciertos parámetros de la subrutina y así poder observar cuál de ellos es el que más influencia tiene en la resistencia del Kevlar. Dentro de los parámetros a modificar, encontramos las tensiones de rotura del material (XT, YT, ZR) y el parámetro que controla la velocidad de degradación de las propiedades del material (S12). Inicialmente estos parámetros eran los siguientes: XT=YT=555E6, S12=77E6, ZR= 34.5E6.

Modificación de parámetros	Velocidad inicial (m/s)	Rompe	Velocidad Residual(m/s)
Sin modificación	300	SI	65.6
XT=YT=750E6; S12=400E6 ZR=150E6	300	NO	
XT=YT=750E6; S12=400E6; ZR=125E6	300	SI	23.5
XT=YT=750E6; S12=450E6; ZR=125E6	300	SI	27.2
XT=YT=750E6; S12=400E6; ZR=140E6	300	NO	
XT=YT=750E6; S12=400E6; ZR=140E6	301	SI	1.8

Tabla 5: Influencia de los parámetros que conforman el material

Como se puede observar, se ha tratado de “calibrar” el modelo utilizando variaciones en las propiedades del material. Hay que destacar que este no sería un modelo válido, pues se han modificado las propiedades del kevlar dejando por tanto de comportarse como tal. Estas variaciones de las propiedades son utilidad para ver que el parámetro S12 tiene una gran influencia en el límite balístico. Se observa que una vez el parámetro S12 supera los  $450 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ , la velocidad residual deja de disminuir y comienza a aumentar.

Por otro lado se puede ver que para conseguir un modelo en el cual el límite balístico sea de  $300 \frac{m}{s}$  mediante modificaciones de las propiedades, el parámetro ZR ha tenido que sufrir un aumento del 100%.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras el proceso de validación, se puede afirmar que este modelo puede emplearse para el estudio de nuevas geometrías. Las geometrías utilizadas, son de proyectiles de tipo FSP. A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el programa de elementos finitos.

### 4.1 Comparación velocidad de entrada velocidad de salida según la geometría

Se realizarán los cálculos necesarios hasta hallar el límite balístico de todas las geometrías. Una vez calculado este, se procederá a realizar los cálculos para las velocidades de 350, 400, 450, 500 y  $600 \frac{m}{s}$ . Cada una de las velocidades necesita aproximadamente unas 8 horas de cálculo en un ordenador con un procesador de 4 núcleos. Si bien es cierto que para altas velocidades se podrá cortar el cálculo con menos tiempo de procesado. Esto es debido a que únicamente se medirán las velocidades de salida del proyectil y este necesita poco tiempo hasta atravesar la placa de kevlar.

Para hacer un análisis de la influencia de la geometría, se deberá modificar el ángulo que forma la diagonal de la bala. Así se podrán comparar los resultados de los diferentes modelos. Los parámetros que se van a comparar mediante gráficas serán la velocidad de impacto de cada proyectil con la velocidad residual.

Debido a que la geometría se modifica, cuanto mayor sea el ángulo modificado mayor masa tendrá. Este aumento de masa es de décimas de gramos por lo que apenas afecta a los resultados. En cada una de las modificaciones habrá que volver a proceder al mallado del proyectil. El mallado de la placa va a permanecer invariable.

#### - Geometría 35°

Se comienza con la geometría para la cual se ha calibrado el modelo. Como se ha calculado en la validación, se sabe que el límite balístico es de  $300 \frac{m}{s}$ . La gráfica que relaciona velocidad inicial con velocidad residual es la siguiente:

Geometría 35°	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
300	0
301	23,12
350	47,15
400	78,67
450	86,01
500	120,1
600	192,9

Tabla 6: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 35°



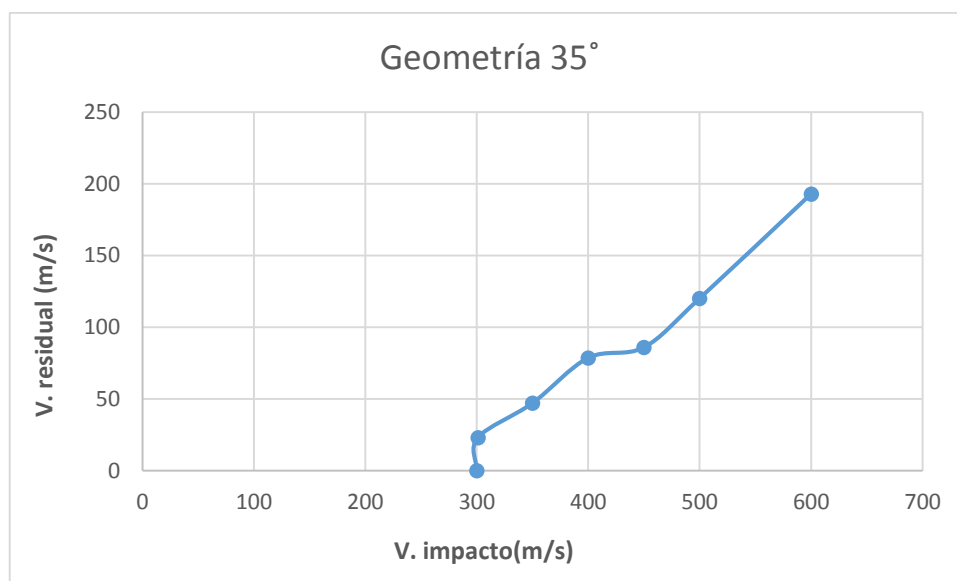


Ilustración 19: Curva balística para geometría de 35°

Si se observa la gráfica, se puede ver como inicialmente la velocidad residual aumenta con una forma de función de raíz cuadrada. Esto significaría que según aumenta la velocidad inicial, la velocidad residual cada vez aumenta menos. Sin embargo a partir de  $400 \frac{m}{s}$ , se observa como la gráfica tiende a estabilizarse a una función lineal.

#### - Geometría 21°:

Es la más compleja de comprender debido a su forma puntiaguda. A priori se piensa que al tener una geometría picuda, el límite balístico debería de ser el más bajo de todas las geometrías estudiadas. Esto sería así en caso de impactar contra otro metal. Sin embargo se está trabajando con un impacto sobre un material compuesto. Al tener una geometría picuda, el proyectil va atravesando las capas de material desorientando a las fibras, pero debido a su forma tardando más en romperlas. Al ir avanzando poco a poco, tiene más superficie que entre en contacto con el material compuesto. Por este motivo hay un mayor rozamiento y su límite balístico es superior al de la geometría de 35°.

Geometría 21°	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
300	0
350	0
370	0
400	39,32
450	59,92
500	121,2
600	174

Tabla 7: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 21°

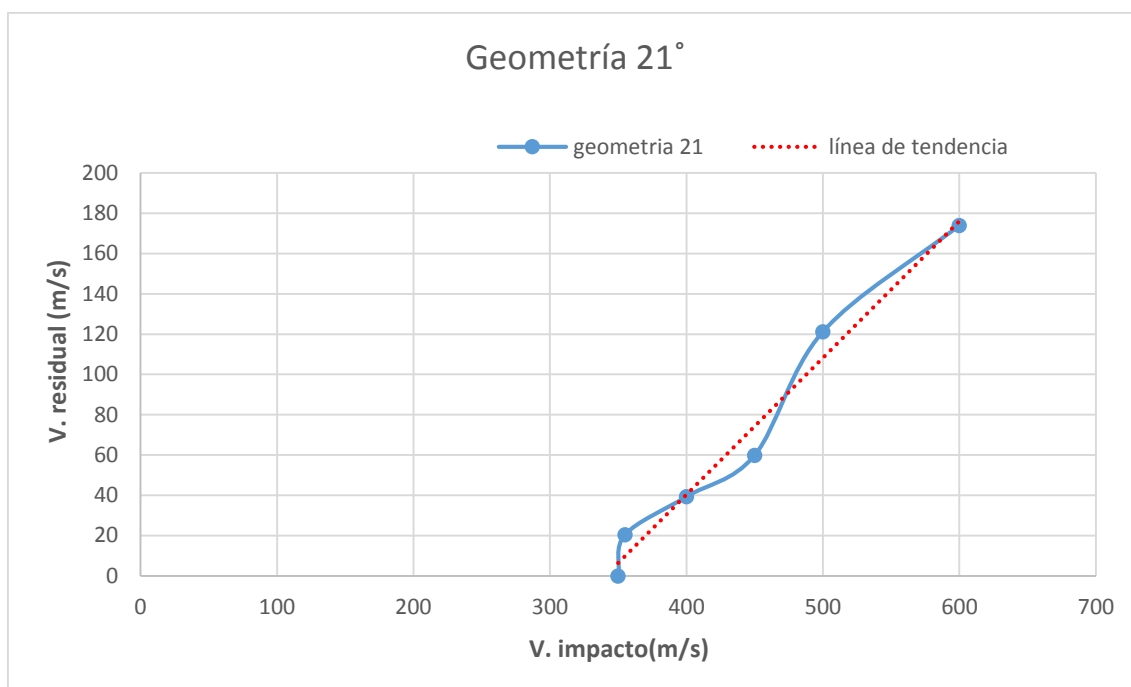


Ilustración 20: Curva balística para geometría de 21°

En este caso el límite balístico está entre 350 y  $355 \frac{m}{s}$ . Para conseguir calcularlo con exactitud se hubiesen necesitado más de 30h de procesamiento de ordenador y no es relevante saber con precisión si está en  $352 \frac{m}{s}$  o  $353 \frac{m}{s}$ . Como se ha comentado previamente, el límite balístico es superior al de 35 grados debido a que velocidades próximas a este límite, la bala va atravesando las capas pero tiene que hacer más esfuerzo para separar las fibras de la matriz. Al aumentar el rozamiento, aumenta el límite balístico.

A partir de una velocidad determinada, se puede observar cómo se estabiliza a una línea recta (se puede ver que la línea de tendencia deja un punto por debajo y otro por encima). Luego se puede afirmar que hasta  $400 \frac{m}{s}$  el proyectil forma un gráfico Velocidad de impacto / Velocidad residual con comportamiento de tipo raíz cuadrada. Una vez se supera esta velocidad, el gráfico se estabiliza a una línea recta.

#### - Geometría 45°:

Se ha comenzado el estudio con el proyectil sobre el cual se ha realizado la validación del modelo. Acto seguido se procederá a aumentar el ángulo de la diagonal del proyectil pero manteniendo fija la altura, es decir, se aumenta el ángulo del pico y por consiguiente la superficie inicial de impacto. Tras analizar los resultados de la geometría puntiaguda, es el turno de ver los resultados de la siguiente geometría encontrada en la literatura científica, la de 45°.

Geometría 45	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
320	0
321	21,56
325	32,55
350	47,68
400	82,25
450	120,9
500	141,2

Tabla 8: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo  $45^\circ$

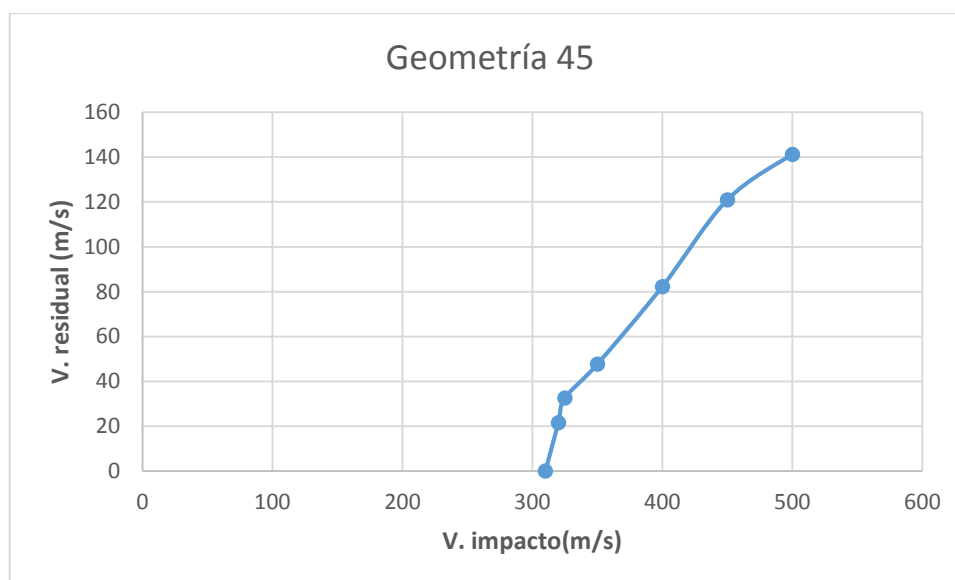


Ilustración 21: Curva balística para geometría de  $45^\circ$

Para esta geometría no se necesitó realizar ensayos con más velocidades tal y como se hizo con las geometrías anteriores. Para el ángulo de bala de  $45^\circ$ , el límite balístico es de  $321 \frac{m}{s}$ . Se puede observar el salto en la gráfica debido a que una vez superado el límite balístico la velocidad residual pasa de 0 a un valor considerable en tan solo un aumento de unidad. Se puede ver en la gráfica, como a partir de  $350 \frac{m}{s}$  en esta geometría hay un comportamiento prácticamente lineal.

Se puede observar comparando con las geometrías anteriores que según se va aumentando la velocidad inicial del proyectil, las diferencias de velocidades residuales de los proyectiles tienden a reducirse. Si bien es cierto que en este caso en particular, la velocidad residual para la velocidad inicial de impacto de  $500 \frac{m}{s}$  puede haber salido un tanto desviada, ya que en el resto de geometrías analizadas, la velocidad residual para esta velocidad de impacto no supera en ningún caso los  $129 \frac{m}{s}$ .

### - Geometría 50°:

Como se puede observar en la gráfica adjunta, las diferencias con la geometría de 45° son ínfimas. Sin embargo se pueden sacar varias conclusiones mediante un análisis de los datos. La primera es que al variar unos pocos grados el ángulo a modificar del proyectil, varían muy poco las velocidades residuales. La segunda es que el límite balístico va a depender del ángulo que se tome, pues este límite balístico y el de 45° tienen valores muy próximos entre sí y distantes respecto al resto de geometrías.

Geometría 50°	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
310	0
324	0
325	20,03
350	67,1
400	102
450	115,4
500	128,5

Tabla 9: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 50°

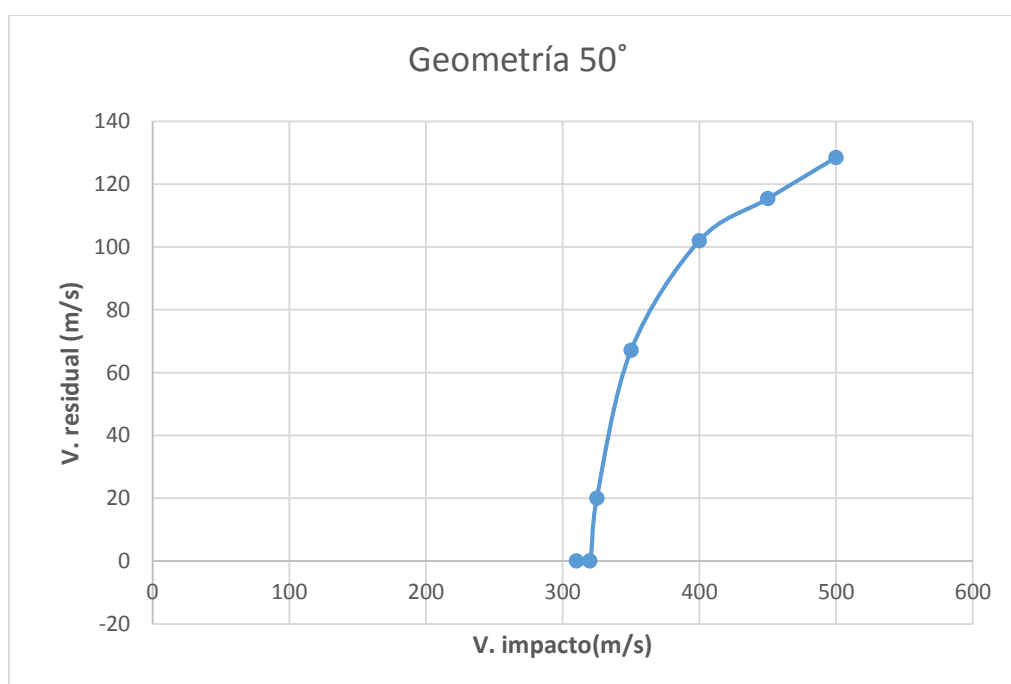


Ilustración 22: Curva balística para geometría de 50°

En esta gráfica se observa perfectamente el comportamiento balístico. La curva desde el límite balístico hasta  $400 \frac{m}{s}$  tiene un crecimiento decreciente. A partir de esta velocidad se estabiliza a una forma lineal. Por lo que se puede afirmar que la gráfica velocidad residual en función de la velocidad de impacto tiene una representación similar a la de

la raíz cuadrada. De todos los modelos con diferentes geometrías, este es en el que más clara se ve la forma standard de una curva balística.

Se puede observar como los valores de las velocidades residuales son muy similares a los de la geometría anterior. Por lo general rondan un 5% arriba o abajo. Que a partir de  $450 \frac{m}{s}$  sean mayores las velocidades residuales de la geometría con un ángulo de  $45^\circ$  puede ser debido no solo a la geometría sino también al peso. Aunque varía muy poco de una geometría con respecto a la otra, supone un impacto a considerar en los resultados.

#### - Geometría $90^\circ$ :

De las geometrías analizadas en las que se obtienen resultados de velocidades residuales es la que tiene más superficie de impacto inicial. Por lo tanto su límite balístico aumenta considerablemente. Ya se puede ver cómo cuanto mayor es el ángulo, mayor es el límite balístico. Sin embargo no se puede ver claramente la curva balística. Esto es debido a que al aumentar el ángulo un 100% en relación al de  $45^\circ$ , el límite balístico se dispara un 40%. Ahora el límite balístico supera los  $400 \frac{m}{s}$ . Al tener tan sólo un rango de velocidades de  $100 \frac{m}{s}$  que poder analizar, no se consiguen sacar muchas conclusiones en claro.

Geometría 90	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
350	0
400	0
425	0
440	0
450	85,27
500	106,2

Tabla 10: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo  $90^\circ$

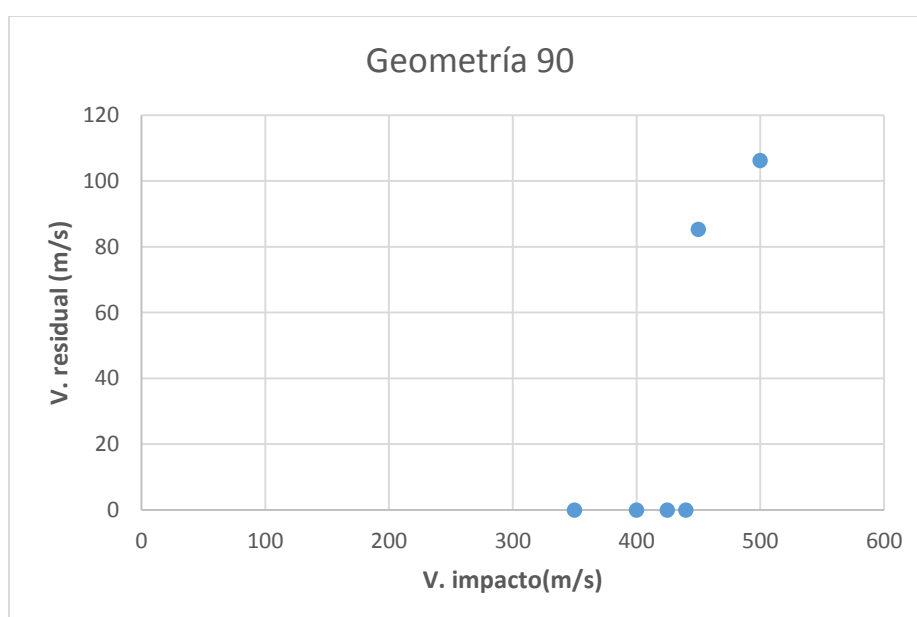


Ilustración 23: Curva balística para geometría de 90°

De estos datos, se puede observar que según va aumentando la velocidad de impacto, se reducen las diferencias de velocidad residual respecto al resto de geometrías. Se deduce entonces que para velocidades muy altas, las velocidades residuales de los proyectiles serán muy similares. Esto es debido a que las gráficas tienen una forma de raíz cuadrada y por lo tanto tienden a estabilizarse. Para valores muy altos (el doble del rango de velocidades estudiado), las diferencias de geometría no influyen prácticamente en las velocidades residuales.

#### - Geometría de 135°:

De esta geometría no se ha logrado sacar ningún dato en claro ya que el límite balístico está por encima del rango de velocidades estudiado. Sí que sirve para afirmar que según se aumenta el ángulo, el límite balístico crece. Debido a que se ha querido tratar de encontrar un valor para tener un dato de referencia del límite balístico, se realizó un cálculo para una velocidad inicial de impacto de  $600 \frac{m}{s}$ . Para esta velocidad inicial de impacto, el proyectil seguía sin atravesar la placa de kevlar. Por lo que se decidió abandonar el cálculo. Se sabe que el límite balístico será superior a la máxima velocidad de impacto estudiada.

Geometría 135°	
Velocidad Inicial (m/s)	Velocidad residual (m/s)
400	0
450	0
500	0
600	0

Tabla 11: Datos de velocidades residuales para geometría de ángulo 135°

## 4.2 Influencia de la geometría en el límite balístico.

En este apartado se analizará exclusivamente el límite balístico. Los datos recogidos para velocidades superiores al límite no se tendrán en cuenta. Se trata de analizar cómo influye el ángulo modificado de la geometría en el límite balístico. En los análisis previos se ha mencionado el límite balístico de cada geometría. Existe un ángulo para el cual la lógica no tiene aplicación. Es el ángulo de pico. Para esta geometría, el límite balístico es superior que para los ángulos de 35, 45 y 50 grados.

Por otro lado, se ha estudiado la geometría de 135°. Sin embargo el límite balístico de no se encuentra en el rango de velocidades estudiado. Por lo que se puede afirmar que es superior a  $600 \frac{m}{s}$ . Aunque no se sabe con exactitud el valor del límite balístico para esta geometría. A continuación se exponen los datos registrados de límites balísticos:

Límites balísticos	
Geometría(°)	Límite(m/s)
21	375
35	300
45	321
50	324
90	445

Tabla 12: Límite balístico en función de la geometría

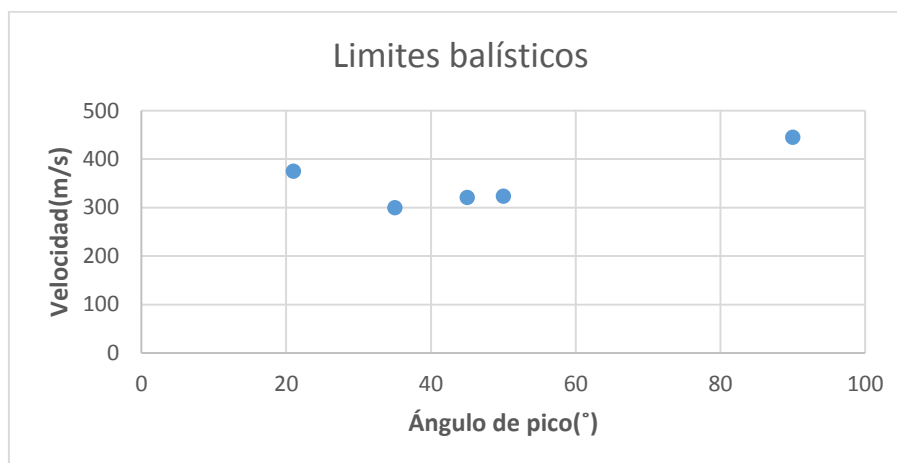


Ilustración 24: Gráfico de límite balístico/ ángulo de pico

Se puede ver en la gráfica como hay un aumento en el límite balístico según se va aumentando el ángulo de pico. Encontramos la excepción en 21°. Como se ha explicado en el apartado de esta geometría, el kevlar es un material compuesto. Esto es que está formado por una serie de fibras orientadas respecto a una matriz. Al tener geometría de pico, el proyectil impactando en las fibras de kevlar, tiene dificultades para romper las fibras de la matriz. Al ir separando en lugar de rompiendo, aumenta el rozamiento entre el proyectil y la placa. Por este motivo, necesita de mayor velocidad de impacto para causar el mismo efecto que una geometría con mayor superficie inicial de impacto.

Si bien es cierto que en un impacto metal con metal, el impacto de un proyectil con forma puntiaguda tendrá un límite balístico inferior a uno con mayor ángulo y una superficie inicial de contacto superior.

A continuación se introduce un gráfico en el cual se incluye la geometría de 135°. En el anterior no se ha introducido esta geometría puesto que el dato del límite balístico no es exacto. Suponiendo que el límite balístico para esta geometría fuese el de la última velocidad de impacto estudiada ( $600\frac{m}{s}$ ), el gráfico quedaría de la siguiente forma:

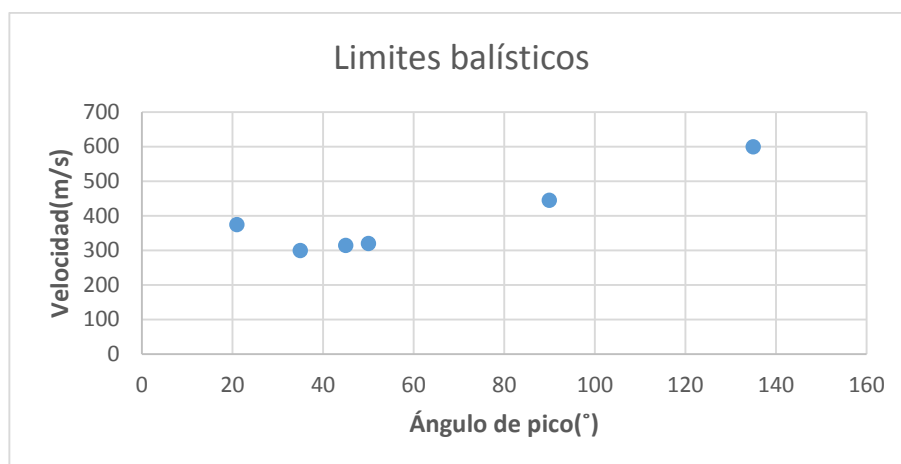


Ilustración 25: Gráfico de límite balístico/ ángulo de pico incluyendo 135°

Introduciendo el ángulo de 135° (teniendo en cuenta que probablemente sea superior a  $600 \frac{m}{s}$ ), se puede observar como la forma que tiene esta gráfica es de una función exponencial. Esto tiene sentido puesto que el caso límite es de un ángulo de 180°. Este ángulo crearía una superficie inicial de contacto infinita. Tiene sentido que para una superficie de contacto inicial infinita, el límite balístico tienda a infinito. Hay que tener en cuenta que en el caso límite, la placa de kevlar debería de ser infinita para poder abarcar la superficie del proyectil.

También se puede afirmar que el proyectil homologado por el ministerio de defensa de los Estados Unidos de América (FSP de 35°) es el que tiene un menor límite balístico al impactar en una placa de kevlar. Esto tiene sentido pues los proyectiles están fabricados con la intención de penetrar las protecciones. Por lo tanto, cuanto menor sea el límite balístico, mayores probabilidades hay de que el proyectil lo atravesase y pueda herir al enemigo del usuario que dispara la bala.

Se llega a la conclusión de que una vez se superan los 35°, al aumentar un % el ángulo de los grados del proyectil, el límite balístico va a aumentar un % cada vez más similar al tanto por ciento aumentado en la geometría. Por ejemplo, al aumentar el ángulo un 28% (de 35° a 45°), el límite balístico aumenta en tan sólo un 5%. Sin embargo si se aumenta un 80% el de 50° (pasa de 50° a 90°), el límite balístico aumenta en un 39%. Por lo que se confirma que cuanto mayor es el aumento del ángulo, mayor será también el aumento del límite balístico.

En último lugar, para comprobar que la modificación de la geometría sigue siendo válida a pesar de no tener resultados experimentales, se comprueba que la validación ha sido correcta mediante una reducción de espesor de la placa de kevlar. En el experimento realizado por Horace Billón, se modifica el espesor de las placas y se proporcionan los límites balísticos. Se ha realizado un cálculo del límite balístico para el proyectil FSP de 35° impactando una placa de kevlar de 5,6mm. En la literatura científica se proporciona un límite balístico de  $190 \frac{m}{s}$ . No se ha realizado más que dos cálculos para ver si el ajuste ha sido válido. Con este espesor a una velocidad de  $185 \frac{m}{s}$  el proyectil

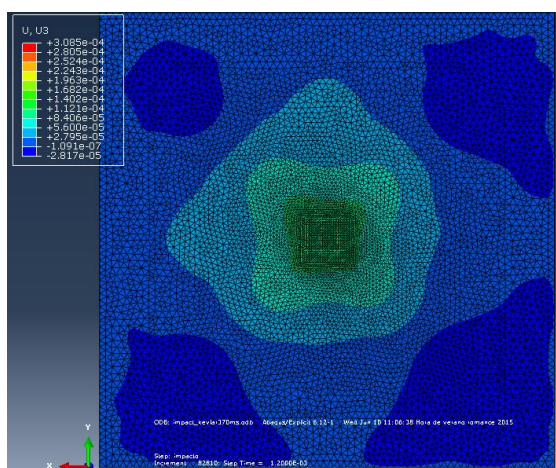


no atravesaba la placa de kevlar. Para una velocidad de  $195 \frac{m}{s}$  se obtiene una velocidad residual de  $28,56 \frac{m}{s}$ . Por lo que se consigue afirmar que el modelo a pesar de realizar una modificación en el espesor de la placa sigue siendo válido con un error de un 2%. Ya que no poseemos datos experimentales del cambio de la geometría, podemos extrapolar la validez del cambio de espesor a un cambio de geometría.

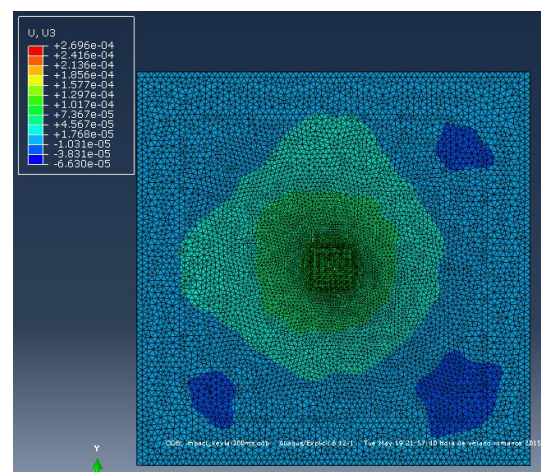
#### 4.3 Análisis de las máximas deformaciones de la placa en el límite balístico.

El límite balístico es la velocidad máxima de impacto de un proyectil que puede soportar el material sin romper. El objetivo principal de este apartado es analizar las máximas deformaciones que sufre la placa en el máximo punto deformado. De esta manera, se logrará analizar el daño que sufriría el usuario en caso de ser impactado por un proyectil a la velocidad del límite balístico.

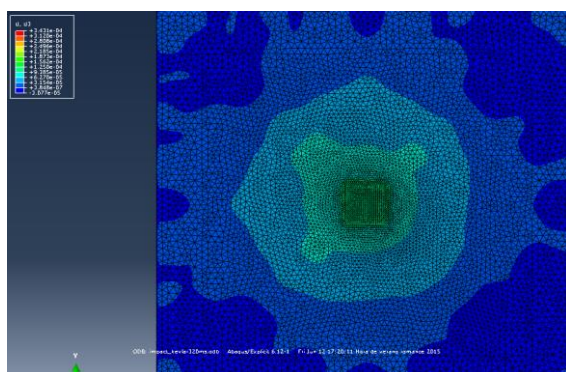
Es lógico suponer que la máxima deformación se localice en el centro de la placa donde impacta el proyectil. La deformación máxima irá aumentando según va avanzando el proyectil hasta el momento en el que la bala se detenga o retroceda. En ese momento la deformación máxima irá reduciendo. De todas las deformaciones que se puedan analizar, interesa lo que se deforma la placa de kevlar en el eje z. Por ello se necesita analizar la componente  $U_3$ .



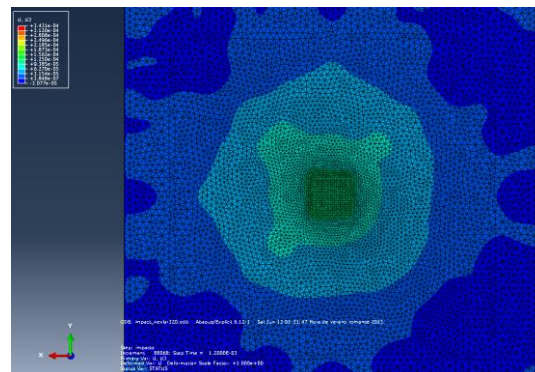
(a)



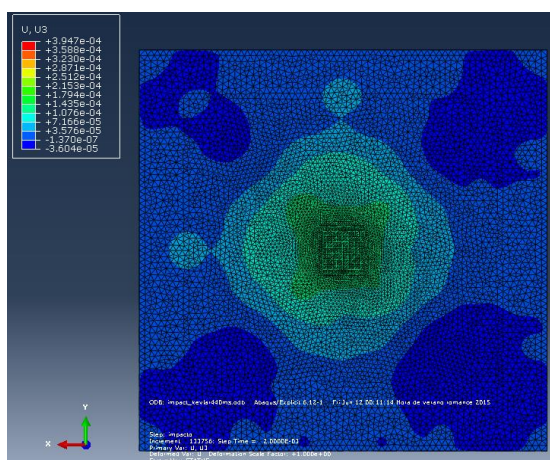
(b)



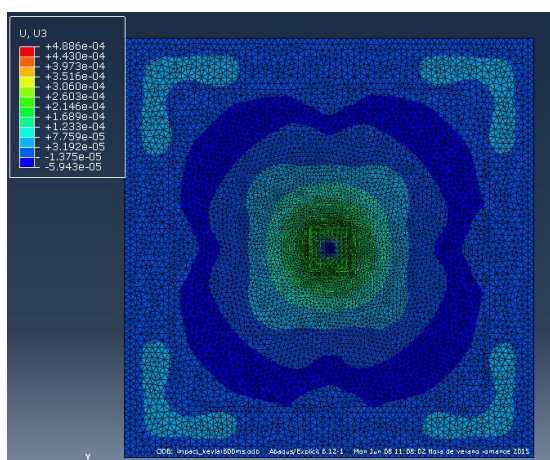
(c)



(d)



(e)

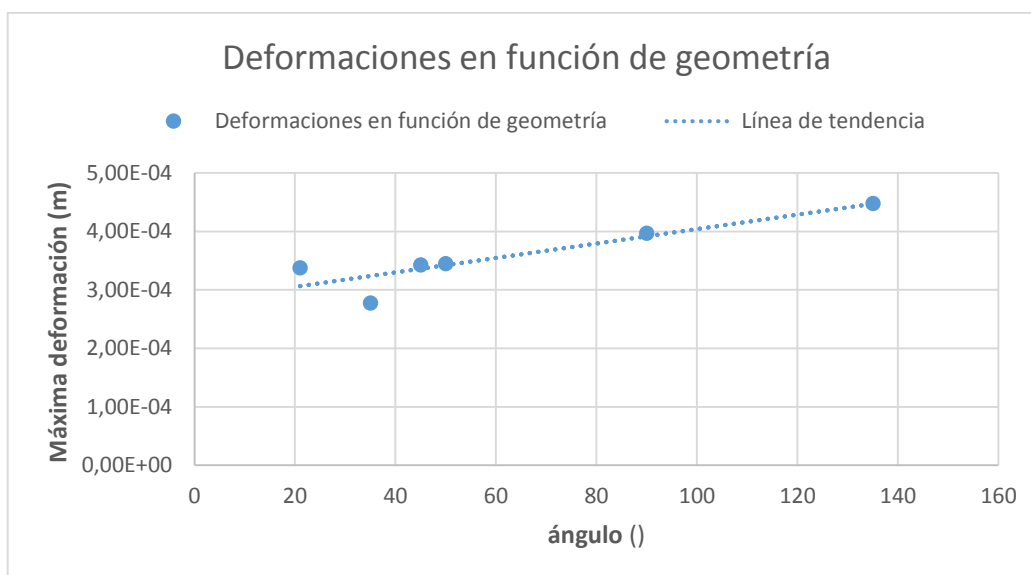


(f)

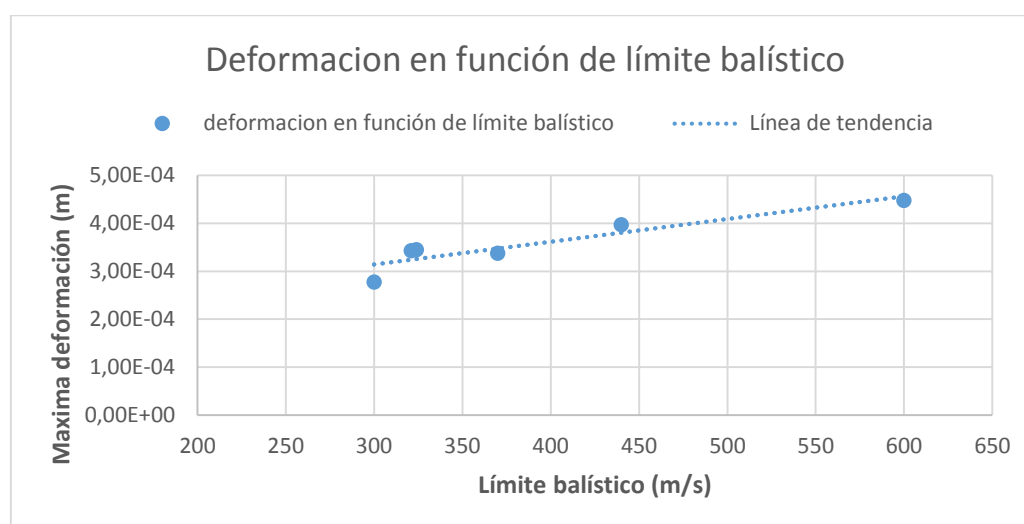
Ilustración 26: Deformaciones máximas en función de la geometría. (a) geometría de 21, (b) geometría de 35, (c) geometría de 4, (d) geometría de 50, (e) geometría de 90, (f) geometría de 135

Deformaciones en función de geometría		
Geometría(°)	Límite(m/s)	Max deformación
21	370	3,38E-04
35	300	2,78E-04
45	321	3,43E-04
50	324	3,45E-04
90	440	3,97E-04
135	600	4,48E-04

Tabla 13: Máximas deformaciones en función de geometría y límite balístico



*Ilustración 27: Gráficas de deformaciones en función del ángulo del proyectil*



*Ilustración 28: Gráficas de deformaciones en función del límite balístico*

Tras analizar los datos, se observa como la máxima deformación que sufre la placa de kevlar es linealmente dependiente del límite balístico. Anteriormente se había visto que salvo el proyectil puntiagudo (ver explicación en 4.2), el límite balístico depende del ángulo.

Es lógico pensar que cuanto mayor sea la velocidad inicial de impacto, mayor va a ser la deformación. En caso de soportar el impacto sin romper, la variable que va a diferenciar una deformación u otra será la velocidad.

Se puede ver que la relación de la deformación máxima con el límite balístico sigue una tendencia lineal. También se observa como a pesar de que tenga una tendencia lineal, hay puntos de la gráfica por encima de la línea de tendencia y puntos por debajo. Esto es porque existe un cierto componente aleatorio que no se puede predecir. Este componente viene dado por la absorción del impacto por medio de las fibras.

Se puede observar en las ilustraciones previas como la máxima deformación se concentra en el centro de la placa. Esto es lógico pues el impacto de la bala lo absorbe la placa y en el lugar del choque, la deformación será máxima. Si se analiza cada uno de los diagramas por separado y paso a paso, se observa como las deformaciones de un paso al siguiente se van distribuyendo a lo largo y ancho de la placa de kevlar. Esto es así debido a las propiedades del kevlar. Absorbe el impacto y lo reparte por todas las fibras que componen la placa protectora.

Si se presta atención al gráfico de la máxima deformación del ángulo de  $135^\circ$ , se ve que es el único que tiene diferencias respecto a los otros 5. El centro de la placa no está deformado (se ve un círculo azul), esto significa que aún no se ha alcanzado el límite balístico. Por eso se afirma que no está en  $600 \frac{m}{s}$ . Sin embargo si se observa el gráfico de deformación en función del límite balístico se concluye que a pesar de no ser  $600 \frac{m}{s}$  el límite, si es un valor muy cercano.

Por último hay que mencionar el efecto de las máximas deformaciones. En el caso extremo (dentro de los estudiados), un proyectil FSP de con un ángulo de pico de  $135^\circ$  impactando a  $600 \frac{m}{s}$ , produce una deformación máxima de 0,45mm. Esta deformación es muy pequeña y no causará daños permanentes sobre el usuario. Si bien es cierto que un proyectil de esta masa disparado a esta velocidad posee una energía cinética de 230.4J y puede dejar grandes marcas en la piel, eso sí, la placa de kevlar cumpliría el objetivo de salvar al usuario que la estuviese utilizando.



## 5. CONCLUSIONES

Una vez realizados todos los cálculos necesarios, las conclusiones que se han obtenido a lo largo de este documento son las siguientes:

### **Creación y validación del modelo:**

Para lograr que un modelo realizado mediante un software de elementos finitos sea válido necesitamos un experimento realizado personalmente en el cual se reproduzcan las condiciones con las que se va a trabajar o bien encontrar un experimento en la literatura científica sobre el cual tomar datos experimentales.

- Se necesita calibrar la subrutina VUMAT para que el modelo realizado por Abaqus sea un modelo válido.
- Una vez se ha validado la subrutina, los resultados obtenidos modificando las geometrías mediante el software de elementos finitos son igualmente válidos. Al no poseer datos de modificaciones de geometría se extrapola la validación de la modificación del espesor de la placa al cambio en la geometría del proyectil.
- Para conseguir una mayor precisión, es necesario aumentar el número de nodos del modelo. A pesar de necesitar más horas de procesamiento de cálculo, los resultados obtenidos siempre van a tener mayor precisión.
- Modificando las propiedades del material dentro de la subrutina se observa que el parámetro más influyente a la hora de hacer el cálculo del límite balístico es el parámetro que controla la velocidad de degradación de las propiedades del material (S12).

### **Influencia de la geometría en las velocidades residuales en función de las velocidades de impacto**

Para poder llevar a cabo esta parte del experimento, se ha tenido que asegurar de antemano que el modelo es válido. Se han analizado 6 tipos de geometrías. Cada una de ellas es diferente a la anterior en el ángulo de pico que posee.

- Todas las geometrías tienen una curva de velocidades residuales en función de las velocidades de impacto con la misma forma.
- Para velocidades muy superiores al límite balístico ( $4 \cdot V_0$ ), las geometrías utilizadas no influyen en las velocidades residuales.
- Modificando ligeramente el ángulo de pico, los resultados de velocidades residuales en función de las velocidades de impacto son muy similares. Para obtener grandes diferencias se necesita realizar una gran modificación del ángulo de pico.
- A partir de una velocidad de impacto determinada (en los ensayos realizados  $400 \frac{m}{s}$ ), la relación velocidad residual en función de las velocidades de impacto tiene una tendencia lineal.

### **Influencia de la geometría en el límite balístico**

El límite balístico va a depender enormemente de la geometría del proyectil.

- Cuanto mayor es el ángulo de punta del proyectil estudiado, el límite balístico aumenta. Esto es debido a que aumenta la superficie inicial de impacto.
- El proyectil de punta no cumple la regla anterior. Esto es debido a que al ser un impacto sobre un material compuesto, para la geometría de punta es más fácil separar las fibras de la matriz pero resulta más complicado romperlas. Por ello, incrementa el rozamiento entre la punta y la placa de kevlar aumentando el límite balístico.
- El límite balístico aumenta no de manera lineal sino exponencial en función del ángulo de punta del proyectil, teniendo el menor límite balístico para la geometría FSP Standard de ángulo de punta de  $35^\circ$ .
- El comportamiento de un material compuesto frente a impacto no tiene la misma respuesta a la geometría que un metal. En el metal, la geometría de pico es la que menor límite balístico tiene.

### **Influencia de la geometría en la máxima deformación**

Resulta interesante estudiar la máxima deformación de la placa de kevlar en el límite balístico para poder analizar los efectos físicos que pueden ocasionarse en el usuario al recibir un impacto en el límite balístico.

- La máxima deformación soportada por la placa es linealmente dependiente del límite balístico. Se ha concluido que el límite balístico depende de la geometría por lo que en primera instancia depende también de la geometría. Existe la excepción del proyectil en pico pues a pesar de tener menor ángulo, tiene mayor límite balístico.
- En el caso extremo estudiado, la máxima deformación no supera los 0,5mm. Sin embargo la energía cinética que posee el proyectil puede causar daños físicos al usuario tales como marcas en la piel.
- En el punto de máximas deformaciones, no importa el valor de la velocidad residual ni del ángulo en relación al reparto de deformaciones en la placa de kevlar. Todas tienen la misma forma, lo único que varía es el valor.
- La máxima deformación para el límite balístico se produce siempre en la zona de impacto del proyectil.

## 5.2 Posibles mejoras del trabajo.

- El documento realizado estudia la influencia de la geometría de un proyectil FSP en el impacto con una placa plana de kevlar. En el mundo actual este material se utiliza no solo para chalecos sino para cascos. Estos últimos tienen una forma curva. Sería interesante realizar una modificación del proyecto con la intención de ver cómo influye la geometría en el impacto de una superficie curva. Se debe tener en cuenta que con esta modificación cambiarían las condiciones y se debería realizar una nueva validación del experimento.
- Sería interesante poder llevar a cabo la realización de ensayos experimentales tanto para recabar mayor cantidad de información para la validación del experimento así como para la comprobación de resultados.

## REFERENCIAS

- [1] RABAB, Robert James, 2007. A Mesomechanical Particle-element Model of Impact Dynamics in Neat and Shear Thickening Fluid Kevlar, [en línea]. The University of Texas at Austin. ProQuest, disponible en:  
<https://books.google.es/books?id=grnxjtEqSwMC&pg=PA11&dq=impact+fragment+simulating+projectile+kevlar&hl=es&sa=X&ei=ttpQVbSZHoKzUaDHgeAK&ved=0CCEQ6AEwAA#v=onepage&q=impact%20fragment%20simulating%20projectile%20kevlar&f=false>
- [2] GONCALVES DA SILVA, M.A. G. CHIOREAN, Cosmin, CISIMASIU y Corneliu, 2001. BALLISTIC SIMULATION OF IMPACT ON COMPOSITE LAMINATES. Universidad de Nova de Lisboa.
- [3] Technical guide kevlar aramide fiber. USA. DuPont
- [4] Abaqus User's Manual, Volume IV: Elements, DS Simulia.
- [5] MORENO SÁNCHEZ, Carlos Edgar, 2014.  
Análisis numérico del comportamiento dinámico de fibras de aramida.  
Marcos Rodríguez Millán, Dir. Universidad Carlos III de Madrid,  
Departamento de Mecánica, Leganés.
- [6] PECHOUCEK, Petr, ROLCH, Stanislav y BUCHAR, Jaroslav, Engineering MECHANICS, Vol. 18, 2011, No. 5/6, p. 353–361
- [7] MIL-DTL-46593B (MR) 6 July 2006 \_ SUPERSEDING MIL-P-46593A (MU) 12 October 1962 w/AMENDMENT 1 /12 October 1964
- [8] A. Karpenko y M. Ceh, 2007. Experimental simulation of fragmentation effects of an improvised explosive device. Tarragona, España.
- [9] Billon, Horace, 1998. A model for ballistic impact on soft armour. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Department of defense Commonwealth of Australia, Melbourne.
- [10] COLORADO RODRÍGUEZ, Javier, 2011.  
Optimización mediante simulación numérica de protecciones ligeras frente a impacto. Marcos Rodríguez Millán, Dir. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Mecánica, Leganés.
- [11] H. L. Gower, D.S. Cronin, A. Plumtree, "Ballistic impact response of laminated composite panels," International journal of impact engineering, 2008.



- [12] MATA DÍAZ, Alberto, 2012. Modelización analítica del impacto de proyectiles rígidos sobre placas de aleaciones de aluminio. Jorge López Puente. Dir. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de ingeniería mecánica, Leganés.
- [13] Zhu, Guoqi, Goldsmith, W. y Dharan, C. K. H., "Penetration of laminated Kevlar by projectiles-II. Analytical model." International Journal of Solids and Structures, 1992
- [14] J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift, L. B. Greszczuk, D. R. Curran, "Impact Dynamics," Krieger Publishing Co., 1982.
- [15] P.M. Cuniff, "Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems," 18th International symposium on ballistics, pp. 1300-1350, San Antonio, Texas, 1999.
- [16] "Teorías sobre la resistencia a rotura de una lámina." Capítulo 5 curso de elasticidad y resistencia de materiales [en línea]. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo5.pdf>
- [17] F. Chang, K. A. Chang, "A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations," Journal of composite materials, 1987
- [18] CHRISTENSEN, Richard M. "Failure criteria for anisotropic fiber composite materials" 2008 [en línea]. Disponible en: [http://www.failurecriteria.com/Media/Failure\\_Criteria\\_for\\_Anisotropic\\_Fiber\\_Composite\\_Materials.pdf](http://www.failurecriteria.com/Media/Failure_Criteria_for_Anisotropic_Fiber_Composite_Materials.pdf)
- [19] CARNICERO, A. Introducción al método de elementos finitos, [en línea] Universidad Pontificia de Comillas. Disponible en: [http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf)
- [20] PRIOR, Alan, 2012. SIMULIA: Past, Present and Future. [En línea] Dassault Systems. Disponible en: <http://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/rums/uk-simulia-pp&f-rum-12.pdf>
- [21] Dassault Systems [web en línea]: <http://www.3ds.com/>
- [23] Erkan Kirtil, Dieter Pestal, Alexander Kollofrath, Nils Gänsicke, Josef Mendler, 2003. Simulating the Impact Behaviour of Composite Aircraft Structures. EADS military Aircraft, Munich. [En línea] disponible en: <http://www.simulia.com/forms/world/pdf2003/Kirtil.pdf>

[24] LUENGO LÓPEZ, Oliver, 2008. Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas aleación NiP. Joan Esteve Pujol. Dir. Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona, Departamento de ingeniería de materiales.